Environment Canada
Environmental Protection Service

Environnement Canada
Service de la protection de l'environnement

1982 Review of Substitutes for Polychlorinated Biphenyls in Transformers

Canada

Economic and Technical Review
Report EPS 3-EP-84-1

Environmental Protection Programs Directorate
March 1984

ENVIRONMENTAL PROTECTION SERVICE REPORT SERIES

Economic and Technical Review Reports relate to state-of-the-art reviews, library surveys, industrial inventories, and their associated recommendations where no experimental work is involved. These reports will either be undertaken by an outside agency or by the staff of the Environmental Protection Service.

Other categories in the EPS series include such groups as Regulations, Codes, and Protocols; Policy and Planning; Technology Development; Surveillance; Training Manuals; Briefs and Submissions to Public Inquiries; and, Environmental Impact and Assessment.

Inquiries pertaining to Environmental Protection Service Reports should be directed to the Environmental Protection Service, Department of the Environment, Ottawa, Ontario, K1A 1C8, Canada.

SÉRIE DE RAPPORTS DU SERVICE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Les rapports d'analyse économique et technique concernant les revues de l'état des connaissances, les relèves de bibliothèques, les inventaires industriels ainsi que leurs recommandations connexes dans les cas où ne comportant pas de travail expérimental. Ces analyses sont entreprises, soit par un organisme extérieur, soit par le personnel du Service de la protection de l'environnement.

Les autres catégories de la série de rapports du S.P.E. comprennent les groupes suivants: règlements, codes et méthodes d'analyse, politique et planification, développement technologique, surveillance, guides de formation, rapports et exposés à l'enquête publique, impacts environnementaux.

Les demandes relatives aux rapports du Service de la protection de l'environnement doivent être adressées au Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, K1A 1C8, Canada.

1982 REVIEW OF SUBSTITUTES FOR POLYCHLORINATED BIPHENYLS IN TRANSFORMERS

Commercial Chemicals Branch
Environmental Protection Service
Environment Canada

EPS 3-EP-84-1E
March 1984

REVIEW NOTICE

This report, based on a report submitted to Environment Canada by M.M. Dillon Ltd., has been reviewed by the Commercial Chemicals Branch, Environmental Protection Service, and approved for publication. Approval does not necessarily infer that the contents reflect the views and policies of the Environmental Protection Service. Mention of trade names or commercial products does not constitute endorsement for use.

© Minister of Supply and Services Canada 1984
Cat. No. En 48-3/84-1E
ISBN 0-662-13227-0
BEAUREGARD PRESS LIMITED

ABSTRACT

This report presents an up-to-date review of PCB substitutes for use in transformers. Included are silicones, aliphatic hydrocarbons, tetrachloroethylene, chlorinated benzene blends, and pentaerythritol ester blends.

TABLE OF CONTENTS

		Page
ABSTRACT		i
LIST OF TABLES		iv
1	INTRODUCTION	1
2	CLASSIFICATION AND ASSESSMENT OF FIRE-RESISTANT TRANSFORMER FLUIDS	3
2.1	General	3
2.2	Silicones	4
2.3	Aliphatic Hydrocarbons	5
2.4	Tetrachloroethylene	7
2.5	Chlorinated Benzene Blends	9
2.6	Pentaerythritol Ester Blends	10
3	IMPACT OF PCB REGULATIONS	14
3.1	Existing Transformer Installations	14
3.2	New Transformer Installations	14
4	TRANSFORMER RETROFILLING	18
5	COMMENTS AND RECOMMENDATIONS	20
5.1	Maintenance of Askarel Transformers	20
5.2	Replacement for Askarel Transformers	20
5.3	New Transformer Installations	20
5.4	PCB Disposal Facilities	
REFERENCES		23

LIST OF TABLES

		Page
1	PHYSICOCHEMICAL AND ENVIRONMENTAL DATA FOR PCB SUBSTITUTES	12
2	COMPARATIVE SUMMARY OF TRANSFORMER FLUIDS	17

1 INTRODUCTION

The primary purpose of this report is to present an up-to-date review of substitutes for Askarel Transformers. Askarel is a generic name for fire-resistant liquid dielectrics consisting of polychlorinated biphenyls (PCBs), usually blended with chlorinated benzenes.

Transformers which contain PCBs as a result of adventitious contamination, but were not designed to contain PCBs, are outside the scope of this review. Therefore, the name Askarel Transformer will be used throughout the report to include only those transformers that were designed for use with askarel.

Askarel Transformers were manufactured on the North American continent for a period of 45 years, between 1932 and 1977. They are used principally in those locations where fire resistance is considered to be an important factor. Thus, they are installed usually inside or close to buildings, where mineral oil transformers are not acceptable because of fire hazard. Askarels have performed extremely well as transformer dielectrics and coolants. Unfortunately, polychlorinated biphenyls were found to be environmentally unacceptable because they are persistent, nonbiodegradable, toxic substances, suspected of carcinogenicity.

Therefore, the use of new askarel in electrical equipment has been banned in Canada by regulations under the Environmental Contaminants Act. The existing Askarel Transformers are allowed to continue in service because:

- probability of PCB escape from a closed system such as an Askarel Transformer is very small,
- PCB disposal facilities in Canada are not yet in place, and
- PCBs contained in an energized Askarel Transformer are under much better supervision than PCBs in storage.

For new installations, however, where fire resistance is essential, and for replacement of Askarel Transformers at their "end of life", suitable substitutes for Askarel Transformers must be found.

The alternatives may be divided into three categories:

- use of *dry-type transformers*,
- provision of fire-resistant vaults for transformers filled with flammable mineral oil, and

- use of transformers filled with fire-resistant fluids, comparable in performance to askarel, but environmentally acceptable.

The use of askarel for new transformers and as a make-up fluid for existing transformers has been banned for several years. There are, however many fluids offered as substitutes for askarel. A comprehensive study of these fluids has been made and the results are presented in Section 2 of this report. The impacts of the Chlorobiphenyl Regulations on the maintenance of existing Askarel Transformers and on the new transformer installations are discussed in Section 3; retrofilling of Askarel Transformers with substitute fluids is discussed in Section 4.

2 CLASSIFICATION AND ASSESSMENT OF FIRE-RESISTANT TRANSFORMER FLUIDS

2.1 General

An ideal transformer fluid should meet all the functional, environmental and economical requirements listed below.

Functional Requirements

- High dielectric strength (greater than 30 kV by ASTM D877).
- Low rate of in-service degradation (sludge formation, moisture pick-up, oxidation and/or acid formation) and long in-service life.
- High resistance to breakdown due to internal arcing.
- Compatibility with materials of construction normally used in transformers (e.g., steel, iron, copper, insulation gasket material).
- Good thermal conductivity, high specific heat and low viscosity over the entire range of operating temperatures to optimize heat transfer capabilities.
- Low pour point (less than -30°C) to enable cold startup without localized overheating.
- Low vapour pressure even at the upper limit of the operating temperature (150°C) to minimize pressure fluctuations in casing and to avoid vapour losses.
- Specific gravity either below or above that of water or ice over the entire range of operating temperatures so that any free water (or ice) remains either at the bottom or on top of the bulk dielectric fluid.
- Low thermal coefficient of expansion to avoid significant fluctuations in equipment fluid operating levels.

Environmental Requirements

- High fire point (greater than 300°C) and high auto-ignition temperature for safety in operation and to qualify for classifications as "non-propagating fluid" by the Canadian Electrical Code and as "less-flammable fluid" by the insurers.
- Low rate of heat release to minimize damage in the event of fire.
- Absence of toxic products of decomposition or combustion for environmental safety in the event of a fire.
- Biodegradable or innocuous when released to the environment.
- Persistence, chronic toxicity and bioaccumulative properties of the chemical in people and the natural environment should be at a minimum.

- Acute toxicity and irritating characteristics to all biota must be at a very low level.
- Waste management aspects of spilled material and final disposal of the material should not create problems.
- Material should not be carcinogenic, teratogenic or mutagenic.
- By-products of combustion or biological degradation should not create secondary concerns along the lines developed above.

Economic Requirements

- Easily manufactured and readily available at a reasonable cost.
- Secure supply for many years.

The following sections relate the properties of specific substitute fluids to these criteria. These substitutes include silicones, aliphatic hydrocarbons, tetrachloroethylene, chlorobenzenes and a pentaerythritol ester blend. Table 1, found at the end of this section (p. 12), compares the relevant physical and chemical properties of these substitutes.

2.2 Silicones

2.2.1 General. Silicones are high-volume industrial chemicals that have found broad usage - antifoams, paper and textile coatings, brake fluids, heat transfer fluids, cosmetic and personal care products, etc. Silicones, such as polydimethylsiloxanes $(CH_3)_3SiO(CH_3)_2SiO_nSi(CH_3)_3$, have been considered as an alternative to askarel because of their fire-resistant and heat transfer properties. Two such fluids are offered as transformer fluids:

- Dow Corning® 561
  Dow Corning Canada Inc.
  6747 Campobello Road
  Mississauga, Ontario
  L5N 2M1

  General Electric SF97 (50)
  Canadian General Electric Company Limited
  720 Caledonia Road
  Toronto, Ontario
  M6B 3X7

Silicone fluid viscosity can be tailor-made for whatever viscosity is required. The dielectric strength is comparable to that offered by askarels. Their low volatility and resistance to thermal oxidation provide good dielectric strength for extended periods of time at high temperatures.

During arcing conditions, bridging of silica occurs between the electrodes. If a fire results, it will produce CH_4, CO_2, silica and water.

Silicone fluids are compatible with most common materials of construction used in electrical apparatus. These fluids may cause stress cracking with certain plastics and rubber-like products.

2.2.3 Fire and Environmental Considerations. These fluids can be burned but will self-extinguish when the source of ignition is removed. When involved in a fire, methane, carbon dioxide, silica and water are formed. A potential hazard of inhalation of finely divided silica warrants use of personal breathing protection during fighting of fires involving silicone.

Silicone may cause slight temporary irritation to the eyes and mucous membranes but will not be absorbed through the skin. The silicone fluids have been found to be biologically inert; therefore, accumulation in the environment may pose a problem.

When in contact with soil, silicones will decompose by nonbiological processes (clay, catalyzed hydrolysis). The volatile products (cyclic siloxanes) will enter the atmosphere where, under the influence of moisture, oxygen and ultraviolet light, they will begin to degrade to SiO_2, H_2O and CO_2. The appearance of cyclic siloxanes is a potential problem because they are absorbed by humans.

Disposal of waste silicone is best accomplished by mixing the fluid with scrap solvent and then incinerating it. Precipitators should be present to remove particulate SiO_2. Spills on water can be contained by booms or dykes, concentrated by a surface-active chemical agent and removed with vacuum systems. Dry cement powder and baked diatomaceous earth are examples of absorbent materials which are used on land spills. Spent absorbent can then be disposed of in the manner described previously.

2.3 Aliphatic Hydrocarbons

2.3.1 General. These fluids are made up of high-molecular-weight branched-chain aliphatic molecules. They are either extracted from natural sources or are produced synthetically. Synthetic aliphatic hydrocarbons (poly-α-olefins) are blends of synthetic polymeric hydrocarbons while the natural aliphatic hydrocarbon is made with highly refined petroleum oil with a high paraffin content. These two fluids have similar chemical compositions, and their characteristics, as an alternative to askarel, are similar to one another. Only the term "aliphatic hydrocarbons" will be used throughout the following.

The following companies offer aliphatic hydrocarbons as a transformer filling fluid:

- RTEmp Fluid (Natural)
  RTE Corporation
  1900 East North Street
  Waukesha, Wisconsin
  USA 53186

- Gulf FR (Synthetic)
  Gulf Oil Chemicals Company
  Olefins and Derivatives Division
  P.O. Box 3766
  Houston, Texas
  USA 77253

- Mepsol (Synthetic and Natural)
  McGraw-Edison Company
  Thomas A. Edison Technical Center
  11131 Adams Road
  P.O. Box 100
  Franksville, Wisconsin
  USA 53126

RTEmp fluid and Gulf FR have been used extensively as a replacement fluid in transformers. Mepsol is a new product which, to date, has had limited consumer use.

These fluids possess low flammability, low specific gravity and high viscosity properties. Additive packages give the fluid blends improved oxidation stability and enhance other physical and chemical properties of the fluid.

2.3.2 Functional Considerations. Aliphatic hydrocarbons are up to 10-20 times more viscous than askarel or typical transformer oils. Some manufacturers claim this to be an advantage since, with a properly designed transformer under overload conditions (high temperature), the aliphatic hydrocarbons can still become less viscous with increasing temperature in a range that is most critical for heat dissipation. It is claimed that with viscosities below 5×10^{-6} m^2/s there is little to be gained for heat dissipation by further decrease in the viscosity. Askarel reaches this point at 50°C; RTEmp typically reaches this viscosity only at temperatures above 150°C.

The dielectric strength and thermal coefficient of expansion are comparable to that offered by askarels. Advantageously, these fluids do not suffer the loss of dielectric strength at temperatures below 0°C that is associated with cold start failure.

The poly-α-olefins exhibit a lower pour point than askarels, which makes their use more versatile at lower temperatures. In spite of the fact that RTEmp fluid clouds

over a broad temperature range, starting at -10°C, it does not exhibit dielectric discontinuity often associated with this clouding phenomenon. During arcing conditions, small amounts of carbon and acetylene are produced but are not considered a serious problem. If poly-α-olefins reach a decomposition stage, hydrogen, methane and carbon monoxide may be released.

Aliphatic hydrocarbons may be used for retrofilling purposes. The liquids are miscible with askarels or other transformer fluids and compatible with most seals and materials used in electrical equipment construction. RTEmp fluid may be used as a make-up fluid for Askarel Transformers for up to 40 per cent by volume. This 40 percent constraint has been set to avoid the point at which the density versus temperature curve of the blended fluid might cross the ice-water density versus temperature curve.

2.3.3 Fire and Environmental Considerations. Aliphatic hydrocarbons have met the Factory Mutual requirements and are considered as low flammability fluids. If the liquids become involved in a fire, aliphatic fragments, carbon dioxide and carbon monoxide may be formed.

In the occupational environment, the care and handling precautions taken for conventional transformer oil should be exercised to control exposure to aliphatic hydrocarbons. These liquids may exert slight irritation to the eyes, skin and mucous membranes. Maximum exposure levels in the workplace have been recommended - TLV• 5 mg/m^3 for oil mists.

Spills of these liquids should be contained, absorbed with clay, sawdust or other industrial sorbents, and scooped into steel drums with covers for recovery or disposal. Disposal of waste aliphatic hydrocarbons can be accomplished by incineration under controlled conditions.

2.4 Tetrachloroethylene

2.4.1 General. Tetrachloroethylene, C_2Cl_4, is a high volume industrial chemical that is used extensively in the dry cleaning industry. Tetrachloroethylene has been considered as an alternative to askarel because it is considered nonflammable and has an advantageously low viscosity. Two companies offer tetrachloroethylene as a transformer fluid:

- WECOSOL™
  Westinghouse Electric Corporation
  Small Power Transformer Division
  South Boston, Virginia
  USA 24592

- Perclene TG•
  Diamond Shamrock Corporation, 1981
  Electro Chemicals Division
  351 Phelps Court
  Irving, Texas
  USA 75061

These products are supplied as highly purified liquids so that the chemical properties are those of tetrachlorethylene. The Westinghouse fluid, WECOSOL^{TM}, is supplied with an additive package at low concentration and an irridescent dye that acts as a leak detector.

2.4.2 Functional Considerations. Tetrachloroethylene is an order of magnitude less viscous than typical transformer oils. This improves heat rejection characteristics. The high density also contributes to thermal benefits of the fluid although the specific heat is lower than askarel and most other fluids.

The dielectric strength is comparable to that of askarels. The results of the electric arcing tests showed no explosive gas formation although small amounts of Cl_2 and HCl are routinely detected along with CO_2 and CO.

Since tetrachloroethylene is a small molecule, there are no problems with sludging.

Both manufacturers warn of compatibility problems. Retrofilling with tetrachloroethylene is not recommended because of gasket compatibility problems encountered with askarel. Immiscibility of tetrachloroethylene with askarel, silicones and other fluids also suggests that it not be used in conjunction with these materials.

2.4.3 Fire and Environmental Considerations. Both Underwriters' Laboratories and Factory Mutual consider this fluid nonflammable although the latter does not approve of it specifically for transformer application. It can be expected that tetrachlorethylene could become involved in a general fire in which case the formation of hydrogen chloride and phosgene (toxic gas) should be considered likely.

Tetrachloroethylene is on the Environmental Contaminants Act 1982 List of Priority Chemicals. In the occupational environment moderate care has to be exercised to control exposure. Tetrachloroethylene irritates the mucous membranes and has anesthetic effects. Maximum exposure levels in the workplace have been recommended - TLV• 100 ppm and STEL 150 ppm. Care should be exercised in the design and operation of transformers to minimize vapour release particularly because tetrachloroethylene boils below the 150°C operating target set for transformers.

Tetrachloroethylene released to the environment will evaporate quickly from water or soil. Degradation through oxidation in the lower atmosphere is fairly rapid, with only 2-3 percent reaching the stratosphere where ozone destruction could be a problem. Disposal of waste tetrachloroethylene by incineration or the equivalent to completely degrade the low-molecular-weight chlorinated hydrocarbons to inorganic chloride is the safest way to minimize adverse environmental impacts. Spill cleanup with standard industrial absorbents is recommended. Spent absorbent should be allowed to "dry", releasing the tetrachloroethylene to the atmosphere rather than disposing of it in a landfill. Incineration or the equivalent would also be highly acceptable.

2.5 Chlorinated Benzene Blends

2.5.1 General. Chlorinated benzene blends are mixtures of isomers of tri- and tetrachlorobenzenes (TTCBs) that are widely used with PCBs in transformers. The chlorinated benzenes were added for viscosity and pour point control. TTCBs have been used as a topping fluid for Askarel Transformers due to their similar properties and compatability with askarels. Two companies offer chlorinated benzene blends as a transformer fluid:

- Tri-Tetrachlorobenzene Blend
  May and Baker Canada Inc.
  Chemicals Department
  6557 Mississauga Road
  Mississauga, Ontario
  L5N 1A6

- Dielectrol I•
  General Electric Company
  One River Road
  Schenectady, New York
  USA 12345

2.5.2 Functional Considerations. TTCBs are an order of magnitude less viscous than typical transformer oils. This improves heat rejection characteristics. The high density also contributes to thermal benefits of the fluid.

The dielectric strength is comparable to that of askarels. The results of electric arcing of the fluid showed no explosive gas formation, although Cl_2 and HCl have been detected. TTCBs have been used as dilutants blended with transformer askarels due to their miscibility and similar properties. Chlorinated benzenes are powerful solvents and often are not compatible with many gasket materials normally used in electrical equipment.

2.5.3 Fire and Environment Considerations. Although TTCBs are considered non-flammable, they will burn at high temperatures yielding hydrogen chloride as one of the products.

In the occupational environment, moderate care has to be exercised to control exposures. Dielectrol 1, which incorporates TTCBs, is a moderate irritant to eyes, skin and mucous membranes. The maximum exposure level in the workplace has been recommended at 300 mg/m^3 (TLV•).

Chlorobenzenes are on the Environment Canada List of Priority Chemicals awaiting further study and evaluation for possible restrictive regulation. Although they exhibit only moderate acute toxicity, they are persistent in the environment and, with a bioaccumulation factor of about 1000, represent a concern for food chain biomagnification. More detailed information about the environmental and toxicological effects of TTCB blends will be required before they can be considered as acceptable substitutes for PCBs in transformers.

Spill cleanup with standard industrial absorbents is recommended. Spent absorbent may then be reclaimed or disposed of. The liquid could also be absorbed on clay or sawdust and scooped into steel drums with covers.

Incineration is not recommended unless a very high temperature facility with absorption of the effluent gas is available.

2.6 Pentaerythritol Ester Blends

2.6.1 General. Blends of esters of pentaerythritol and fatty acids have been offered as a substitute for askarels. These esters have been considered as an alternative to askarels because of their low flammability and high performance characteristics. The following companies offer Midel 7131, a pentaerythritol ester blend, as a transformer fluid:

- Micanite & Insultators Co. Limited (U.K.)
  Westinghouse Road
  Trafford Park, Manchester
  England M17 1PR

- The D & D Group
  P.O. Box 372
  Smithville, Ontario
  L0R 2A0

2.6.2 Functional Considerations. Midel 7131 is four times more viscous than typical transformer oil. The pour point of the ester is lower than that of askarels, which makes its use more versatile at lower temperatures.

The dielectric strength, thermal conductivity and coefficient of expansion are comparable to that offered by typical transformer oils. No toxic substances or gases are generated during arcing conditions. The ester is compatible with the wide range of materials used in transformers. Due to its compatibility, retrofilling and make-up with Midel does not pose a problem.

2.6.3 Fire and Environmental Considerations. This fluid meets the low flammability requirements which permit its use as a substitute fluid in transformers. Recommended handling precautions for petroleum-based fluids should be exercised when handling Midel.

TABLE 1 PHYSICOCHEMICAL AND ENVIRONMENTAL DATA FOR PCB SUBSTITUTES

	Silicones		Aliphatic Hydrocarbons		
	Dow Corning 561	GE SF97(50)	RTEmp	Gulf FR	Mepsol
Molecular Weight	high	high	high	high	high
Boiling Point (°C)	-	-	>430	-	-
Freezing Point (°C)	-55	-	-70**	-80**	-
Specific Gravity @ (°C)	0.96@25	0.96@25	0.877@25	0.861@16	0.872@25
Vapour Density	-	-	-	-	-
Vapour Pressure kPa @ (°C)	-	-	$<1.3\times10^{-3}$	-	-
Solubility (g/L) - in H_2O	-	-	Negligible	-	-
- H_20 in	0.05	0.21	0.035(max)	-	0.009
Interfacial Tension (mN/m)	50.0[1]	45.0[2]	38.0	-	-
Dielectric Constant @ 25°C	2.65	2.7	2.4	2.3	2.2
Dielectric Strength (kV)	35	35	43	44	37
Power Factor @ 25°C (%)	<0.0001	<0.0001	<0.001	0.003	-
Viscosity (m^2/s) @ (°C)	50×10^{-6}@25	50×10^{-6}@25	350×10^{-6}@25	113×10^{-6}@38	410×10^{-6}@23
@ (°C)	16×10^{-6}@100	16×10^{-6}@100	85×10^{-6}@50	12×10^{-6}@99	216×10^{-6}@40
@ (°C)	-	-	16×10^{-6}@100	-	-
Pour Point (°C)	-55	-55	-30	-48	-30
Specific Heat (J/(kg·K)	1530	1530	1925[1]	-	2700[2]
Thermal Coeff. of Expansion ($°C^{-1}$)	9.2×10^{-4}	10.55×10^{-4}	7.5×10^{-4}	-	6.9×10^{-4}
Relative Thermal Conductivity(W/(m·K))	0.15	0.16	0.13[1]	-	0.15[2]
Specific Resistance(Ω·m) @ (°C)	2.3×10^{13} @25[1]	5.8×10^{13} @25[2]	8×10^{10} @25	-	2×10^{12} @23
@ (°C)	9.3×10^{12} @100[1]	4.6×10^{12} @100[2]	-	-	-
Flammability	low	low	low	low	low
Flash Point (°C)	300	300	285	265	278
Fire Point (°C)	350	320	312	310	312
Heat Release Rates (kW/m^2)					
- Convective	53	66	546	564	542
- Radiative	25	26	361	414	411
TLV*† (mg/m^3)	-	-	5 (mist)	5 (mist)	-
STEL†† (ppm)	-	-	-	-	-
Bioaccumulation	none	none	-	-	-
Degradation	non-biodegradable	non-biodegradable	-	-	-
Evaporation from water(half-life)(min)	-	-	-	-	-
Hydrolysis	-	-	-	-	-

* Single column data properties of tetrachloroethylene

** Glass transition

† Threshold Limit Value

†† Short-term Exposure Limit (15 min)

††† Time-weighted Average, 8 h/d, 40-h work week

Tetrachloroethylene		Chlorinated Benzenes		Pentaerythritol Ester Blend	Comment
Wescosol™*	Perclene TG**	TTCB Blend	Dielectral I*	Midel 7131	
165.85		-	-	614	
121		210	>204	>400	
-22.4		-	-	-60	
1.62@( )		139@( )	1.37@( )	0.98@15.6	
5.83		-	6	-	
2.65@26.3		-	<0.13	1.3×10^{-8}@( )	
0.15		slight	<1%	0@20°C	
0.11		-	-	0.08	
3.23		37.5	-	-	[1],[2]ASTMD-971
2.2	2.4	5.0	5.0	3.2	ASTMD-924
40	40	32	32	60[1]	ASTMD-877;[1]BS148
0.3	0.3	>0.2	-	<0.001[1]	ASTMD-924 except[1]
0.55×10^{-6}@25[1]	0.52×10^{-6}@25	1.49×10^{-6}@25	3.45×10^{-6}@25	100×10^{-6}@20	ASTMD-88;[1]ASTMD-80
0.46×10^{-6}@50	-	0.96×10^{-6}@50[1]	0.82×10^{-6}@100[2]	6×10^{-6}@100	[1],[2]ASTMD-80
0.74×10^{-6}@100	-	0.71×10^{-6}@100	-	-	
-	-22	-15(-30 max)	-15(-30 max)	-50	ASTMD-97
880[3]	880	1590	1170	2100	[1],[2]ASTMD-2266;[3]ASTMD-276
10.2×10^{-4}[1]	10.2×10^{-4}	8×10^{-4}	8×10^{-4}	7.5×10^{-4}	ASTMD-1903 except[1]
0.13[3]	0.13	0.07	-	0.155	[1],[2]ASTMD-2713;[3]ASTMD-271
-	1.8×10^{11}	1.1×10^{8}	$>1 \times 10^{10}$	20×10^{10}	[1],[2]ASTMD-1169
-	-	-	-		[1],[2]ASTMD-1169
non-flam[1]		non-flam	non-flam	low[2]	[1],[2]Underwriters' Lab.
none		none	none	>257[1]	ASTMD-92;[1]IP 36/63
none		none	none	>310[1]	ASTMD-92;[1]IP 36/63
538[1]		370	370	377	Factory Mutual except[1]
411[1]		238	238	116	Factory Mutual except[1]
100 (ppm)TWA+++[1]		-	300	0	[1]OSMA
150 (15min)			-	-	
-		-	-	-	
-		-	-	-	
20-27		-	-	-	
none @150°C		-	-	-	

3 IMPACT OF PCB REGULATIONS

3.1 Existing Transformer Installations

PCBs were banned as constituents of transformers manufactured in or imported into Canada after 1 July 1980, when the Amendment to Chlorobiphenyl Regulation No. 1 came into effect. The use of Askarel Transformers manufactured or imported before 1 July 1980 is still permitted; none of the other Chlorobiphenyl Regulations in preparation at the present time would prohibit the continued use of these transformers.

Handling of PCBs as part of normal maintenance and/or repair of Askarel Transformers is permitted but adding new PCB-containing liquids is banned. Therefore, any transformer fluid losses must be made up by non-PCB fluids which are compatible with askarel.

The most obvious choice for a make-up fluid is TTCBs which are already a component part of all transformer askarels. The content of TTCBs in different brands of askarel varies but generally does not exceed 40 percent.

Since the pour point of pure TTCBs is much higher than that of most askarels, there was a concern that the dilution of askarels with TTCBs may be harmful to lightly loaded or de-energized transformers at low ambient temperatures.

Tests performed by M.M. Dillon Limited in March 1979 demonstrated that up to one-third of pure TTCBs can be added safely to transformer askarels which already contain as much as 40 percent of TTCBs in the initial formulation.

The information obtained from three major transformer service companies and confirmed by a large number of transformer users indicates that transformer fluid make-up requirements are far below the safe limits recommended for TTCB make-up. Based on our contacts with a large segment of transformer manufacturers and users, we have formed an opinion that no hardship exists due to the ban on the use of PCBs for the transformer make-up fluid.

Although the most widely used make-up fluid is TTCBs, other fluids such as RTEmp or Mdel 7131 appear to be satisfactory for this purpose. Both liquids have been used for topping up of Askarel Transformers with good results.

3.2 New Transformer Installations

The ban on Askarel Transformers created the problem of finding a suitable

substitute for those new transformer applications where a fire-resistant installation is essential.

3.2.1 Dry-type Transformers. For some applications, the use of air-cooled dry-type transformers, in lieu of Askarel Transformers, is the most suitable solution. Dry-type transformers can be divided into three general categories, with respect to their construction:

- open ventilated
- epoxy encapsulated, and
- cast coil.

Dry-type transformers are limited in their application with respect to voltage class and capacity.

They are most economical to use as open-case ventilated-type in clean, dry locations when the primary voltage does not exceed 15 kV and the load does not exceed 600 kVA.

They tend to be noisy and have relatively low overload capability and poor basic impulse level. Also, they are physically larger than an equivalent liquid-filled transformer.

Epoxy-sealed and cast coil transformers are not as noisy as the open-case ventilated transformers and are not subject to the same restrictions with respect to ambient conditions. However, they are generally more costly than an equivalent liquid-filled transformer. The cost comparison would depend on the specific voltage and kVA ratings as well as the type of liquid used.

Since dry-type transformers are physically larger than liquid-filled transformers of the same capacity and voltage class, it is more difficult or even impossible, at some locations, to replace an Askarel Transformer with an equivalent dry-type unit, because of space limitations.

3.2.2 Liquid-filled Transformers. The criteria for selecting liquid-filled transformers can be grouped into four categories:

I Safety Considerations

Low fire and explosion hazard.

II Functional Requirements

Satisfactory performance under all foreseeable operating conditions such as load fluctuations, and lightning and switching surges.

III Environmental Considerations

Transformer fluid to be non-toxic, non-mutagenic and biodegradable or innocuous if released to the environment. The transformer fluid must be easily disposable with no cause for present or future ecological concerns.

IV Economic Considerations

Reasonable cost of manufacture and low operating costs, i.e., high efficiency under load, low no-load losses and easy maintenance.

Askarel transformers satisfy all safety, functional and economic considerations but fail to meet the environmental requirements.

Transformers filled with mineral oil satisfy all functional, environmental and economic considerations, but fail to meet the safety requirements.

Therefore, there is a need for safe and reliable transformer fluids that would satisfy all four groups of transformer fluid selection criteria.

Table 12 presents a comparative assessment of the five types of fluids that are described in Section 2 of this report:

- Silicones
- Aliphatic Hydrocarbons
- Tetrachloroethylene
- Chlorinated Benzene Blends
- Pentaerythritol Ester Blend

These five types of fire-resistant fluids are all acceptable for indoor use. Askarel is not acceptable for environmental reasons and mineral oil is not acceptable for indoor use unless installed in a fire-proof vault. It must be noted that mineral oil transformers are still very satisfactory and the most economical choice for outdoor installations.

Tetrachloroethylene and TTCB blends are nonflammable and therefore get the highest rating with respect to safety.

Silicones, aliphatic hydrocarbons and blends of pentaerythritol ester are listed by Factory Mutual Research as "Less Flammable Transformer Fluids". The heat release rates, both convective and radiative, published by Factory Mutual Research are significantly lower for silicones than for aliphatic hydrocarbons and pentaerythritol ester blend. Therefore, under the safety criteria in Table 12, silicones are classified as "satisfactory" and the other two types as "acceptable". The heat release rates of the

pentaerythritol ester blend are lower than those of aliphatic hydrocarbons, but not nearly as low as those of silicones.

All fluids listed in Table 12 are very satisfactory as far as the functional performance is concerned, when used in a new transformer designed for that specific type of fluid.

Environmentally, there is some concern regarding TTCB blends, and to a lesser degree, tetrachloroethylene. Both fluids are presently approved for uses other than in transformers. Additional studies are needed to further evaluate the environmental risk posed by these two types of fluids.

All fire-resistant transformer fluids are more expensive than mineral oil.

TABLE 2 COMPARATIVE SUMMARY OF TRANSFORMER FLUIDS

	Selection Criteria			
Type of Fluid	Safety	Functional	Environmental	Economic
Silicones	3	4	4	2
Aliphatic Hydrocarbons	2	4	4	3
Tetrachloroethylene	4	4	3	3
Chlorinated Benzene Blends	4	4	2	3
Pentaerythritol Ester Blends	2	4	4	2
Askarel	4	4	1	3*
Mineral Oil	1**	4	4	4

Ratings***

4 - very satisfactory

3 - satisfactory

2 - acceptable

1 - unsatisfactory

* Askarel no longer available.

** When used indoors, without fire-proof vault.

*** Based on judgement of contractor.

4 TRANSFORMER RETROFILLING

Replacement of askarel in a transformer with another fluid, known as transformer retrofilling, has been practiced in the United States since about 1975, a few years after Monsanto discontinued production of askarel. The present level of retrofilling activity in the USA is reported to be in the range of 600 to 800 units per year.

The fluids most frequently used for retrofilling are:

- Mineral Oil (for outdoor or fire-proof vault installations).
- Silicones
- RTEmp
- Midel 7131, recently introduced from the U.K.

Generally, the performance of the retrofilled units has been satisfactory. There is no evidence indicating that the replacement of askarel with another fluid has been directly responsible for a transformer failure. In some cases, it was necessary to derate the transformer capacity by 10-20 percent because of the differences in the viscosity and specific heat between askarel and the replacement fluid.

In spite of the success, the retrofilling activity in the USA has decreased considerably from the peak of activity in 1979. Some of the reasons given for the decrease are:

- bad publicity resulting from accidental PCB spills during retrofilling operations.
- restrictions placed by Factory Mutual Research on the use of retrofilled transformers. Some replacement fluids are not considered equal to askarel with respect to fire hazard.

In Canada, retrofilling has never caught on. A few Askarel Transformers were retrofilled with silicone and one or two with mineral oil during the 1976-1981 period. One Askarel Transformer, at a municipal waterworks plant, was retrofilled with Midel 7131 in April 1982 as an experimental demonstration.

In many cases, it is impractical and environmentally undesirable to retrofill Askarel Transformers as long as there are no PCB disposal facilities readily available. Storage of askarel and PCB-containing flushing fluids generated by retrofilling may present higher environmental and health hazards than the continued use of Askarel Transformers installed in guarded areas with access limited to authorized personnel.

In future, when PCB disposal facilities are available, retrofilling should be considered from some specific installations, as an option to replacement with a new non-PCB unit. Getting rid of askarel would be particularly desirable at such locations as food processing plants and proximity to water bodies, where even a small probability of PCB spill due to a transformer failure is considered to be an unacceptable risk. In some of these locations, replacement of the Askarel Transformer with a new non-PCB unit may be much more difficult and more costly than retrofilling.

When retrofilling is being considered, the following factors must be taken into account:

- The replacement fluid must be compatible with the materials of construction of the transformer being retrofilled.
- The coefficient of thermal expansion of the replacement fluid should be relatively close to that of askarel, to prevent exposure of transformer windings at low temperatures and excessive volume of transformer fluid at high temperatures.
- Heat transfer capability of the replacement fluid must be considered and the acceptability of transformer derating reviewed, if applicable.
- Impact of insurance requirements and all applicable rules and regulations of the local electrical inspection authorities must be checked with respect to the proposed replacement fluid.

5 COMMENTS AND RECOMMENDATIONS

5.1 Maintenance of Askarel Transformers

The ban on the use of PCBs for make-up filling of Askarel Transformers does not seem to create any significant problems for the transformer users. The amounts of make-up fluid required are very small. Most Askarel Transformers do not require any make-up fluid for many years of service. When make-up fluid is required, tri-and tetrachlorobenzenes (TTCBs) appear to be the most suitable and most readily available fluids. TTCBs are fully compatible with askarel, since it is one of the components of askarel. Other fluids successfully used for make-up filling of Askarel Transformers are Midel 7131 and RTEmp.

5.2 Replacement for Askarel Transformers

There is no single "best" solution for the replacement of any Askarel Transformer regardless of the type of duty, ambient conditions and location.

For outdoor use and for underground vaults, mineral oil transformers appear to be the best solution.

For indoor applications, constructing a fire-proof vault in an existing building would, in most cases, be either impractical or prohibitive in cost. Generally, therefore, the replacement of Askarel Transformers in existing buildings would be by other than equipment containing mineral oil. The choice of the right transformer for the right place involves consideration of many factors in addition to cost.

If a dry-type transformer is considered, such factors as noise level, clean air requirements, moisture levels, load fluctuations, lightning protection and physical space available must be taken into account.

If a fire-resistant liquid-filled transformer is considered, the most important factors are:

- heat release ratings (both convective and radiative) of the transformer fluid;
- insurance requirements, related to building construction of adjacent walls and ceiling, and curbs to retain leaks of transformer fluids;
- operating conditions and maintenance requirements.

5.3 New Transformer Installations

Selection of the most suitable transformer for a new installation is much easier than the selection of a replacement transformer. There are usually fewer

constraints and therefore more than one acceptable solution. The decision would be based on the selection criteria discussed in Section 3 of this report.

Where fire and explosion safety is the most important consideration, e.g., in case of underground substations in mines, a transformer filled with a nonflammable fluid such as tetrachloroethylene would be the best choice.

In other applications, environmental considerations may dictate the use of transformers filled with one of the fluids classified by Factory Mutual as "less flammable fluid" such as silicones or pentaerythritol ester blend.

Further research and development of better transformer fluids are still in progress and the most ideal replacement fluid for askarel may be yet to come.

BIBLIOGRAPHY

Silicones

Information About Silicone Transformer Liquids, Dow Corning Corporation, Midland, Michigan 48640. (1980).

New Silicone Transformer Fluid; An Environmental Review, Pollution Engineering, Volume 9, Number 8, pp 41-43. (August, 1977).

Polydimethylsiloxane Fluids; Environmental Impact Analysis, M.P. Scarbel, General Electric Company, Silicone Products Department, Waterford, New York. (November 18, 1976).

Replacement Dielectric Liquids for Askarels in Capacitors and Transformers, R. Strom, Ontario Hydro, for the Canadian Electrical Association, Montreal, Quebec, 062D117. (October, 1981).

Silicone Dielectric Fluids for Liquid Filled Transformers, J. S. Hurley, Jr., and Dr. A. Jorkelson, General Electric Company, Waterford, New York 12188. Presented at the Power Engineering Society, 1974 Winter Meeting, New York, New York. (January 27 - February 1, 1974).

Silicone Liquid Filled Transformers, R.A. Nelson, General Electric Company, Medium Transformer Department, Rome, Georgia. Presented at the American Power Conference, Chicago, Illinois. (April 19, 1977).

Silicone Product Data Sheet, Silicone Dielectric Fluid SF 97 (50), General Electric Company, Silicone Products Department, Waterford, New York 12188.

Silicone Technical Information Sheet, SF 97 (50) - A Dielectric Coolant for Liquid Filled Transformers, General Electric Company, Silicone Products Department, Waterford, New York 12188.

Aliphatic Hydrocarbons

Comments and Recommendations on Make-up Fluid for Askarel Transformers (Technical Paper), John Olmsted, RTE Corporation, RTE Fluids Division, 1900 E. North Street, Waukesha, Wisconsin 53186. (November 15, 1977).

Comments and Recommendations on Retrofilling of Transformers, John Olmsted, RTE Corporation, 1900 E. North Street, Waukesha, Wisconsin 53186. (October 31, 1977).

Material Safety Data Sheet, Gulf FR Electrical Fluid, and Additional Information, Gulf Oil Chemicals Company, P.O. Box 3766, Houston, Texas 77001. (October, 1980).

Operation and Maintenance of RTEmp Fluid Filled Transformers, J.B. Caldwell, RTE Corporation, RTE Fluids Division, 1900 E. North Street, Waukesha, Wisconsin 53186.

PCB Substitutes - New Developments in Materials and Applications, James Caldwell, RTE Corporation, RTE Fluids Division, 1900 E. North Street, Waukesha, Wisconsin 53186. For presentation at the 49th Annual Engineering Conference of the Missouri Valley Electric Association. (April 12, 1978).

Product Information Sheet, RTEmp Fluid, RTE Corporation, RTE Fluids Division, 1900 E. North Street, Waukesha, Wisconsin 53186. (January 21, 1980).

Replacement Dielectric Liquids for Askarels in Capacitors and Transformers, R. Strom, Ontario Hydro, for the Canadian Electrical Association, Montreal, Quebec. (October, 1981).

Technical Information, Uniroyal PAO-13CE, Uniroyal Chemical Company, Division of Uniroyal, Inc., Spencer Street, Naugatuck, Connecticut 06770.

Toxicity, Transport Mechanisms and Environmental Impact of Dielectric Fluids, Margaret Piotrowski, RTE Corporation, 1900 E. North Street, Waukesha, Wisconsin 53186. (June, 1978).

Typical Mepsol Properties Sheet, McGraw-Edison Company, 11131 Adams Road, Franksville, Wisconsin 53126. (1982).

Tetrachloroethylene

Diamond Shamrock's PCB Substitute, Chemical Week. (January 20, 1982).

Nonflammable Small Power Transformers, K.R. Linsley, Westinghouse Electric Corporation, American Power Conference. (April 29, 1981).

Questions and Answers Relating to Wecosol™ Transformer Fluid, Westinghouse Electric Corp., South Boston, Virginia, Circular SA 11040.

Technical Bulletin, Perclene TG™, Diamond Shamrock Corporation, P.O. Box 191, Plainsville, Ohio 44077.

Chlorinated Benzene Blends

Environment Canada Infonotes CCB-IN-5-80. Substances in the List of Priority Chemicals - 1979: Chlorobenzenes.

Material Safety Data Sheet for Iralec, General Electric Company, One River Road, Schenectady, New York 12345. (March, 1982).

Product Information Sheet for Iralec, Prodelec, 21 rue Jean Garjon, Paris 75008.

Provisional Specifications for tri/tetrachlorobenzene blend, May and Baker Canada, Inc., Mississauga, Ontario L5N 1A6.

Replacement Dielectric Liquids for Askarels in Capacitors and Transformers, R. Strom, Ontario Hydro, for the Canadian Electrical Association, Montreal, Quebec. (October, 1981).

Esters

Midel 7131, The Micanite & Insulators Co. Ltd., Westinghouse Road, Trafford Park, Manchester, M17 1PR, England. (September, 1980).

Typical Comparison Data, Midel 7131, The D & D Group, Special Projects Division, P.O. Box 372, Smithville, Ontario, L0R 2A0.

Environnement Canada
Environment Canada

nental
on

Revue des substituts des polychlorobiphényles dans les transformateurs (1982)

Canada

Analyse économique et technique
SPE 3-EP-84-1F

Direction générale des programmes de protection de l'environnement
Juillet 1984

LES RAPPORTS DU SERVICE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Les rapports d'analyse économique et technique font le point sur l'état des connaissances, présentent des études bibliographiques et des inventaires industriels et comportent des recommandations afférentes, dans la mesure où celles-ci n'impliquent aucune recherche expérimentale. La préparation des rapports peut être confiée soit au personnel du Service de la protection de l'environnement, soit à des entreprises ou organismes dont il sollicite les services.

Le Service publie nombre d'autres rapports dans les collections suivantes : Règlements, codes et méthodes d'analyse, Politique et planification, Développement des techniques, Surveillance, Exposés et mémoires soumis à des enquêtes publiques, Évaluation des incidences sur l'environnement et Guides de formation.

Pour tout renseignement, prière de s'adresser au Service de la protection de l'environnement, ministère de l'Environnement, Hull (Québec), Canada, K1A 1C8.

ENVIRONMENTAL PROTECTION SERVICE REPORT SERIES

Economic and Technical Review Reports relate to state-of-the-art reviews, library surveys, industrial inventories, and their associated recommendations where no experimental work is involved. These reports will either be undertaken by an outside agency or by the staff of the Environmental Protection Service.

Other categories in the EPS series include such group as : Regulations, Codes and Protocols; Policy and Planning; Technology Development; Surveillance; Training Manuals; Briefs and Submissions to Public Inquiries; and Environmental Impact and Assessment.

Inquiries pertaining to Environmental Protection Service Reports should be directed to the Environmental Protection Service, Department of the Environment, Hull, Québec, Canada, K1A 1C8.

REVUE DES SUBSTITUTS DES POLYCHLOROBIPHÉNYLES DANS LES TRANSFORMATEURS (1982)

Direction des produits chimiques commerciaux
Service de la protection de l'environnement
Environnement Canada

SPE 3-EP-84-1F
Mars 1984

AVIS

Le présent document, basé sur un rapport soumis à Environnement Canada par M.M. Dillon Ltée, a été revu par la Direction des produits chimiques commerciaux du Service de la protection de l'environnement qui en a approuvé la publication. Cette approbation ne signifie pas nécessairement que le contenu est conforme aux vues et aux politiques du Service de la protection de l'environnement. La mention de marques de commerce ou de produits commerciaux ne signifie pas que l'on en recommande ou approuve l'emploi.

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1984
N° de cat. En 48-3/84-1F
ISBN 0-662-92765-6
IMPRIMERIE BEAUREGARD LIMITÉE

RÉSUMÉ

Le présent travail est une mise à jour des substituts des PCB employés dans les transformateurs, dont les silicones, les hydrocarbures aliphatiques, le tétrachloroéthylène, les mélanges de chlorobenzènes et les mélanges d'esters de penta-érythritol.

ABSTRACT

This report presents an up-to-date review of PCB substitutes for use in transformers. Included are silicones, aliphatic hydrocarbons, tetrachloroethylene, chlorinated benzene blends, and pentaerythritol ester blends.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé/Abstract		III
Liste des tableaux		VII
1	INTRODUCTION	1
2	CLASSIFICATION ET ÉVALUATION DES FLUIDES ININFLAMMABLES POUR TRANSFORMATEURS	3
2.1	Aperçu général	3
2.1.1	Critères de fonctionnement	3
2.1.2	Critères de protection de l'environnement	3
2.1.3	Critères économiques	4
2.2	Silicones	4
2.2.1	Information générale	4
2.2.2	Considérations relatives à l'environnement et aux cas d'incendie	5
2.3	Hydrocarbures aliphatiques	10
2.3.1	Information générale	10
2.3.2	Considérations relatives au fonctionnement	11
2.3.3	Considérations relatives à l'environnement et aux cas d'incendie	12
2.4	Tétrachloro-éthylène	12
2.4.1	Information générale	12
2.4.2	Considérations relatives au fonctionnement	13
2.4.3	Considérations relatives à l'environnement et aux cas d'incendie	13
2.5	Mélanges de chlorobenzènes	14
2.5.1	Information générale	14
2.5.2	Considérations relatives au fonctionnement	14
2.5.3	Considérations relatives à l'environnement et aux cas d'incendie	15
2.6	Mélanges d'esters de penta-érythritol	15
2.6.1	Information générale	15
2.6.2	Considérations relatives au fonctionnement	16
2.6.3	Considérations relatives à l'environnement et aux cas d'incendie	16

3	RÉPERCUSSIONS DES RÈGLEMENTS SUR L'UTILISATION DES POLYCHLOROBIPHÉNYLES	17
3.1	Transformateurs existants	17
3.2	Installation de nouveaux transformateurs	18
3.2.1	Transformateurs secs	18
3.2.2	Transformateurs à isolant liquide	18
4	REMPLISSAGE DES TRANSFORMATEURS	22
5	COMMENTAIRES ET RECOMMANDATIONS	24
5.1	Entretien des transformateurs à l'ascarel	24
5.2	Remplacement des transformateurs à l'ascarel	24
5.3	Installation de nouveaux transformateurs	24
Bibliographie		26

LISTE DES TABLEAUX

1	Données physicochimiques et environnementales sur les substituts des PCB	6
2	Comparaison des fluides pour transformateurs	20

1 INTRODUCTION

L'objet premier du présent ouvrage est de faire une mise à jour des substituts employés dans les transformateurs isolés avec des ascarels. Le nom générique "ascarel" est employé pour désigner les liquides isolants et ininflammables à base de polychlorobiphényles (PCB), habituellement mélangés avec des chlorobenzènes.

Les transformateurs contenant des PCB par suite d'une contamination accidentelle ne font pas l'objet de la présente étude. L'expression "transformateur à l'ascarel" ne désigne que les transformateurs conçus pour fonctionner avec des ascarels.

Les transformateurs à l'ascarel ont été fabriqués sur le continent nord-américain pendant quarante-cinq ans, soit de 1932 à 1977. Ils sont utilisés principalement dans les endroits où la résistance au feu est considérée un facteur essentiel. On les installe donc aux endroits où il est défendu de se servir de transformateurs à l'huile minérale à cause des risques d'incendie, c'est-à-dire, en général, à l'intérieur des édifices ou près de ceux-ci. L'ascarel se comporte très bien comme fluide diélectrique et de refroidissement pour les transformateurs. On a malheureusement trouvé que les polychlorobiphényles étaient indésirables dans l'environnement, car ils sont persistants, non biodégradables, toxiques et soupçonnés d'être cancérogènes.

Les réglementations en vertu de la Loi sur les contaminants de l'environnement interdisent donc l'utilisation au Canada de nouveaux liquides isolants contenant des PCB dans l'équipement électrique. Il est cependant permis de continuer de se servir des transformateurs isolés à l'ascarel existants car:

a) la probabilité d'une fuite de PCB d'un système clos comme un transformateur isolé à l'ascarel est très faible;

b) il n'existe pas encore au Canada d'installations destinées à l'élimination des PCB;

c) les PCB présents dans les transformateurs sous tension isolés à l'ascarel sont beaucoup mieux surveillés que les PCB stockés.

Il faut cependant trouver des solutions de remplacement acceptables pour les transformateurs à l'ascarel qui doivent être remplacés parce que trop vieux et pour les nouvelles installations où les transformateurs doivent être ininflammables.

Il existe trois possibilités:

a) utiliser des transformateurs "secs";

b) prévoir des voûtes résistantes au feu pour les transformateurs à huile minérale inflammable;

c) ou utiliser des transformateurs à fluides ininflammables ayant un rendement comparable à celui des ascarels, mais acceptables écologiquement.

On a interdit depuis plusieurs années l'utilisation de l'ascarel dans les nouveaux transformateurs et, comme liquide de remplacement, dans les transformateurs existants. Il existe cependant bien des liquides isolants pouvant remplacer les ascarels. Ces liquides ont fait l'objet d'une étude complète, dont les résultats sont présentés au chapitre 2 du présent rapport. On traite au chapitre 3 des répercussions des *Règlements sur les biphényles chlorés* sur l'entretien des transformateurs existants isolés à l'ascarel et sur l'installation des nouveaux transformateurs; on traite au chapitre 4 du remplissage des transformateurs isolés à l'ascarel avec des fluides de remplacement.

2 CLASSIFICATION ET ÉVALUATION DES FLUIDES ININFLAMMABLES POUR TRANSFORMATEURS

2.1 Aperçu général

Un fluide isolant pour transformateur idéal doit rencontrer tous les critères de fonctionnement, de protection de l'environnement et de coûts suivants.

2.1.1 Critères de fonctionnement

- Rigidité diélectrique élevée (supérieure à 30 kV, selon ASTM D877).
- Faible taux de dégradation à l'utilisation (formation de boues, rétention d'humidité, oxydation et(ou) formation d'acides) et longue durée d'utilisation.
- Forte résistance au bris par formation d'un arc interne.
- Compatibilité avec les matériaux de construction utilisés normalement dans les transformateurs (c.-à-d., acier, fer, cuivre, matériaux pour joints isolants).
- Bonne conductivité thermique, grande chaleur spécifique et faible viscosité sur toute la plage des températures de fonctionnement afin d'optimiser la capacité caloporteuse.
- Basse température d'écoulement (inférieure à -30 °C) afin de favoriser le démarrage à froid sans surchauffe locale.
- Faible tension de vapeur, même à la limite supérieure de la température de fonctionnement (150 °C), afin de minimiser les fluctuations de pression dans le boîtier et pour éviter les pertes de gaz.
- Densité soit inférieure, soit supérieure à celle de l'eau ou de la glace sur toute la plage des températures de fonctionnement, de façon que toute l'eau libre (ou la glace) demeure soit à la base, soit au sommet de la masse du fluide diélectrique.
- Faible coefficient de dilatation thermique permettant d'éviter des fluctuations importantes du niveau du fluide lorsque l'appareil fonctionne.

2.1.2 Critères de protection de l'environnement

- Point d'inflammation élevé (supérieur à 300 °C) et température élevée d'inflammation spontanée assurant un fonctionnement sécuritaire et permettant de le classer comme "fluide ne favorisant pas la propagation", conformément au Code canadien de l'électricité, et comme "fluide moins inflammable" (*less flammable fluid*) d'après les normes des assureurs.

- Faible taux de dégagement de chaleur minimisant les dommages en cas d'incendie.
- Absence de produits toxiques de décomposition ou de combustion pour un milieu sécuritaire en cas d'incendie.
- Biodégradable ou sans danger s'il y a fuite du produit dans l'environnement.
- Persistance, toxicité chronique et bio-accumulation minimales du produit chimique chez l'homme et dans le milieu naturel.
- Toxicité aiguë et propriétés irritantes très faibles envers tous les biotes.
- Les questions de récupération et d'élimination des matériaux déversés ne devraient pas poser de problème.
- Le matériau ne doit pas être cancérogène, tératogène ni mutagène.
- Les sous-produits de combustion ou de dégradation biologique ne doivent causer aucune inquiétude à l'égard des propriétés énoncées ci-dessus.

2.1.3 Critères économiques

- Facilité de production et d'approvisionnement à un coût raisonnable.
- Approvisionnement assuré pour de nombreuses années.

Les sections suivantes étudient, en fonction de ces critères, les propriétés de fluides de remplacement spécifiques soit, entre autres: les silicones, les hydrocarbures aliphatiques, le tétrachloro-éthylène, les chlorobenzènes et un mélange d'esters de pentaérythritol. Le lecteur trouvera au tableau 1 une énumération des propriétés physiques et chimiques pertinentes de ces produits de remplacement.

2.2 Silicones

2.2.1 Information générale. Les silicones sont des produits chimiques industriels existant en grande quantité et pour lesquels on a trouvé de nombreux usages (agents antimousse, revêtements pour papier et tissu, fluides hydrauliques pour frein, fluides caloporteurs, produits cosmétiques et d'hygiène personnelle, etc.). On croit que les silicones, par exemple les polydiméthylsiloxanes $(CH_3)_3SiO\text{-}(CH_3)_2\text{-}SiO_nSi(CH_3)_3$, pourraient remplacer les ascarels à cause de leur ininflammabilité parce qu'ils sont caloporteurs. On a suggéré l'utilisation de deux de ces fluides dans les transformateurs:

- Dow Corning® 561
  Dow Corning Canada Inc.
  6747 Campobello Road
  Mississauga (Ontario)
  L5N 2M1

- General Electric SF97 (50)
  Canadian General Electric Company Limited
  720 Caledonia Road
  Toronto (Ontario)
  M6B 3X7

La viscosité des silicones peut, au besoin, être ajustée à n'importe quelle valeur. Leur rigidité diélectrique est comparable à celle des ascarels. Leur faible volatilité et leur résistance à l'oxydation thermique assurent une bonne rigidité diélectrique pendant des périodes prolongées à des températures élevées.

Lorsqu'il y a formation d'un arc électrique, il se produit des ponts de silice entre les électrodes. En cas d'incendie, il y a production de CH_4, de CO_2, de silice et d'eau.

Les silicones liquides sont compatibles avec la plupart des matériaux de construction les plus utilisés dans les appareils électriques. Ces fluides peuvent provoquer la fissuration sous tension de certains produits plastiques et caoutchouteux.

2.2.2 **Considérations relatives à l'environnement et aux cas d'incendie.** Ces fluides brûlent, mais s'éteignent d'eux-même lorsque la source d'inflammation disparaît. En cas d'incendie, il y a formation de méthane, de dioxyde de carbone, de silice et d'eau. Étant donné le danger potentiel d'inhaler des particules fines de silice, il est conseillé de porter un appareil respiratoire autonome lorsque l'on combat des incendies touchant des silicones.

Ces substances peuvent causer une légère irritation temporaire de l'oeil et des muqueuses, mais elles ne sont pas absorbées à travers la peau. On a trouvé que les silicones liquides étaient biologiquement inertes; c'est pourquoi leur accumulation dans l'environnement peut poser des problèmes.

Au contact du sol, les silicones se décomposent par des processus non biologiques (hydrolyse catalytique, argile). Les produits volatils (siloxanes cycliques) pénètrent dans l'atmosphère où, sous l'effet de l'humidité, de l'oxygène et de la lumière ultraviolette, ils commencent à se dégrader en SiO_2, en H_2O et en CO_2. La formation de siloxanes cycliques peut devenir un problème, car ils sont absorbés par l'homme.

TABLEAU 1 DONNÉES PHYSICOCHIMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES SUR LES SUBSTITUTS DES PCB

	Silicones	
	Dow Corning 561	GE SF97(50)
Masse molaire	élevée	élevée
Point d'ébullition, en °C	–	–
Point de congélation, en °C	- 55	–
Densité relative	0,96 (à 25 °C)	0,96 (à 25 °C)
Densité de vapeur	–	–
Tension de vapeur	-	–
Solubilité (g/l)		
– dans H_2O	–	–
– H_2O dans	0,05	0,21
Tension interfaciale (mN/m)	50,0[a]	45,0[b]
Constante diélectrique à 25 °C	2,65	2,7
Rigidité diélectrique en kV	35	35
Facteur de puissance à 25 °C, en %	< 0,0001	< 0,0001
Viscosité	50×10^{-6} m²/s (à 25 °C) 16×10^{-6} m²/s (à 100 °C) –	50×10^{-6} m²/s (à 25 °C) 16×10^{-6} m²/s (à 100 °C) –
Point d'écoulement, en °C	- 55	- 55
Chaleur massique, en J/kg • K	1530	1530
Coefficient de dilatation thermique, en $°C^{-1}$	$9,2 \times 10^{-4}$	$10,55 \times 10^{-4}$
Conductivité thermique relative en W/(m · K)	0,15	0,16
Résistivité (Ω · m) @ (°C)	$2,3 \times 10^{13}$ Ω · m (à 25 °C)[a]	$5,8 \times 10^{13}$ Ω · m (à 25 °C)[b]
@ (°C)	$9,3 \times 10^{12}$ Ω · m (à 100 °C)[a]	$4,6 \times 10^{12}$ Ω · m (à 100 °C)[b]
Inflammabilité	faible	faible
Point d'éclair (°C)	300	300
Point d'inflammation	350	320
Taux de dégagement de chaleur (kW/m^2)		
– Convection	53	66
– Radiation	25	26
TLV®† en mg/m^3	–	–
STEL††, en ppm	–	–
Bio-accumulation	aucune	aucune
Dégradation	non biodégradable	non biodégradable
Évaporation de l'eau (demi-vie), en mn	–	–
Hydrolyse	–	–

* La colonne centrale donne les propriétés du tétrachloro-éthylène même.

** Transition vitreuse.

† TLV® (*treshold limit value*): teneur limite moyenne (pondérée en fonction du temps) à laquelle la majorité des travailleurs peut être exposée, à raison de 8 heures par jour, 5 jours par semaine.

†† STEL (*short term exposure limit*): teneur limite à laquelle les travailleurs peuvent être exposés de façon continue pour une courte période sans danger.

††† Moyenne pondérée en fonction du temps, à raison de 8 heures par jour, 5 jours par semaine.

TABLEAU 1 (Suite)

	Hydrocarbures aliphatiques		
	RTEmp	Gulf FR	Mepsol
Masse molaire	élevée	élevée	élevée
Point d'ébullition, en °C	> 430	–	–
Point de congélation, en °C	- 70**	- 80**	–
Densité relative	0,877 (à 25 °C)	0,861 (à 16 °C)	0,872 (à 25 °C)
Densité de vapeur	–	–	–
Tension de vapeur	$< 1,3 \times 10^{-3}$ kPa	–	–
Solubilité (g/l)			
– dans H_2O	négligeable	–	–
– H_2O dans	0,035 (max.)	–	0,009
Tension interfaciale (mN/m)	38,0	–	–
Constante diélectrique à 25 °C	2,4	2,3	2,2
Rigidité diélectrique, en kV	43	44	37
Facteur de puissance à 25 °C, en %	< 0,001	0,003	–
Viscosité	350×10^{-6} m²/s (à 25 °C) 85×10^{-6} m²/s (à 50 °C) 16×10^{-6} m²/s (à 100 °C)	113×10^{-6} m²/s (à 38 °C) 12×10^{-6} m²/s (à 99 °C) –	410×10^{-6} m²/s (à 23 °C) 216×10^{-6} m²/s (à 40 °C) –
Point d'écoulement, en °C	- 30	- 48	- 30
Chaleur massique, en J/kg · K	1925[a]	–	2700[b]
Coefficient de dilatation thermique, en $°C^{-1}$	$7,5 \times 10^{-4}$	–	$6,9 \times 10^{-4}$
Conductivité thermique relative en W/(m · K)	0,13[a]	–	0,15[b]
Résistivité (Ω · m) @ (°C)	8×10^{10} @ 25	–	2×10^{12} @ 23
@ (°C)	–	–	–
Inflammabilité	faible	faible	faible
Point d'éclair (°C)	285	265	278
Point d'inflammation	312	310	312
Taux de dégagement de chaleur (kW/m^2)			
– Convection	546	564	542
– Radiation	361	414	411
TLV® †, en mg/m^3	5 (brouillard)	5 (brouillard)	–
STEL††, en ppm	–	–	–
Bio-accumulation	–	–	–
Dégradation	–	–	–
Évaporation de l'eau (demi-vie), en mn	–	–	–
Hydrolyse	–	–	–

TABLEAU 1 (Suite)

	Tétrachloro-éthylène*	
	Wecosol™	Perclene TG®
Masse molaire	165,85	
Point d'ébullition, en °C	121	
Point de congélation, en °C	- 22,4	
Densité relative	1,62	
Densité de vapeur	5,83	
Tension de vapeur	2,65 kPa (à 26,3 °C)	
Solubilité (g/l)		
– dans H_2O	0,15	
– H_2O dans	0,11	
Tension interfaciale (mN/m)	3,23	
Constante diélectrique à 25 °C	2,2	2,4
Rigidité diélectrique, en kV	40	40
Facteur de puissance à 25 °C, en %	0,3	0,3
Viscosité	$0,55 \times 10^{-6}$ m²/s (à 25 °C)[a]	$0,52 \times 10^{-6}$ m²/s (à 25 °C)
	$0,46 \times 10^{-6}$ m²/s (à 50 °C)	–
	$0,74 \times 10^{-6}$ m²/s (à 100 °C)	–
Point d'écoulement, en °C	–	- 22
Chaleur massique, en J/kg · K	880[c]	880
Coefficient de dilatation thermique, en $°C^{-1}$	$10,2 \times 10^{-4}$[a]	$10,2 \times 10^{-4}$
Conductivité thermique relative en W/(m · K)	0,13[c]	0,13
Résistivité (Ω · m) @ (°C)	–	$1,8 \times 10^{11}$
@ (°C)	–	–
Inflammabilité	ininflam.[a]	
Point d'éclair (°C)	aucun	
Point d'inflammation	aucun	
Taux de dégagement de chaleur (kW/m²)		
– Convection	538[a]	
– Radiation	411[a]	
TLV® †, en mg/m³	100 (ppm) TWA†††[a]	
STEL††, en ppm	150 (15 mn)	
Bio-accumulation	–	
Dégradation	–	
Évaporation de l'eau (demi-vie), en mn	20-27	
Hydrolyse	aucune (à 150 °C)	

TABLEAU 1 (Suite)

	Chlorobenzènes		Mélanges d'esters de penta-érythritol	
	Mélanges de chlorobenzènes	Dielectral I ®	Midel 7131	Remarques
Masse molaire	–	–	614	
Point d'ébullition, en °C	210	> 204	> 400	
Point de congélation, en °C	–	–	- 60	
Densité relative	139	1,37	0,98 (à 15,6 °C)	
Densité de vapeur	–	6	–	
Tension de vapeur	–	< 0,13 kPa	$1,3 \times 10^{-8}$ kPa	
Solubilité (g/l)				
– dans H_2O	légère	< 1 %	0 (à 20 °C)	
– H_2O dans	–	–	0,08	
Tension interfaciale (mN/m)	37,5	–	–	[a,b]ASTMD-971
Constante diélectrique à 25 °C	5,0	5,0	3,2	ASTMD-924
Rigidité diélectrique, en kV	32	32	60[a]	ASTMD-877; [a]BS148
Facteur de puissance à 25 °C, en %	> 0,2	-	< 0,001[a]	ASTMD-924 sauf a
Viscosité	$1,49 \times 10^{-6}$ m²/s (à 25 °C)	$3,45 \times 10^{-6}$ m²/s (à 25 °C)	100×10^{-6} m²/s (à 20 °C)	ASTMD-88;
	$0,96 \times 10^{-6}$ m²/s (à 50 °C)[a]	$0,82 \times 10^{-6}$ m²/s (à 100 °C)[b]	6×10^{-6} m²/s (à 100 °C)	[a]ASTMD-80
	$0,71 \times 10^{-6}$ m²/s (à 100 °C)	–	–	[a,b]ASTMD-80
Point d'écoulement, en °C	-15 (-30 max.)	- 15 (- 30 max.)	- 50	ASTMD-97
Chaleur massique, en J/kg · K	1590	1170	2100	[a,b]ASTMD -2266; [c]ASTMD -276
Coefficient de dilatation thermique, en °C⁻¹	8×10^{-4}	8×10^{-4}	$7,5 \times 10^{-4}$	ASTMD-1903 sauf a
Conductivité thermique relative en W/(m · K)	0,07	–	0,155	[a,b]ASTMD -2713; [c]ASTMD-271
Résistivité (Ω · m) @ (°C)	$1,1 \times 10^{8}$	$> 1 \times 10^{10}$	20×10^{10}	[a,b]ASTMD -1169
@ (°C)	–	–		[a,b]ASTMD -1169
Inflammabilité	ininflam.[a]	ininflam.[a]	faible[b]	[a,b]Underwriters' Lab.
Point d'éclair (°C)	aucun	aucun	> 257[a]	ASTMD-92; [a]IP 36/63
Point d'inflammation	aucun	aucun	> 310[a]	ASTMD-92; [a]IP 36/63
Taux de dégagement de chaleur (kW/m²)				
– Convection	370	370	377	Factory Mutual, sauf a
– Radiation	238	238	116	Factory Mutual, sauf a
TLV®†, en mg/m³	–	300	0	[a]OSMA
STEL††, en ppm		–	–	
Bio-accumulation	–	–	–	
Dégradation	–	–	–	
Évaporation de l'eau (demi-vie), en mn	–	–	–	
Hydrolyse				

La meilleure façon de se débarrasser des silicones usées, est de mélanger le liquide avec des solvants usés et de les incinérer. Il faut se servir de dépoussiéreurs pour enlever les particules de SiO_2. Les déversements accidentels de silicones dans l'eau peuvent être confinés au moyen d'estacades ou de digues; on peut concentrer alors le produit à l'aide d'un surfactant chimique et le pomper ensuite à l'aide d'un système d'aspiration sous vide. En cas de déversements sur le sol, les matériaux absorbants utilisés peuvent être, par exemple, de la poudre de ciment sec et de la terre à diatomées cuite. On peut ensuite se débarrasser de l'absorbant usé de la façon déjà décrite.

2.3 Hydrocarbures aliphatiques

2.3.1 Information générale. Ces fluides sont composés de molécules aliphatiques ramifiées à masse moléculaire élevée. On les extrait de sources naturelles, ou on les synthétise. Les hydrocarbures aliphatiques synthétiques ou (poly-α-oléfines) sont des mélanges de polymères synthétiques, alors que les hydrocarbures aliphatiques naturels sont obtenus à partir de pétrole très raffiné ayant une teneur élevée en paraffine. Leur composition chimique est semblable, ainsi que leurs propriétés, en ce qui concerne leur utilisation comme substituts des ascarels. Pour le reste du texte, on ne se servira que de l'expression "hydrocarbures aliphatiques".

Les compagnies suivantes proposent des hydrocarbures aliphatiques utilisables comme fluide isolant pour transformateur:

- Fluide RTEmp (naturel)
  RTE CORPORATION
  1900 East North Street
  Waukesha, Winsconsin
  USA 53186

- Gulf FR (synthétique)
  Gulf Oil Chemicals Company
  Olefins and Derivatives Division
  P.O. Box 3766
  Houston, Texas
  USA 77253

- Mepsol (synthétique et naturel)
  McGraw-Edison Company
  Thomas A. Edison Technical Center
  11131, chemin Adams
  B.P. 100
  Franksville, Wisconsin
  USA 53126

On s'est beaucoup servi du RTEmp fluide et du Gulf FR comme fluide de remplacement dans les transformateurs. Le Mepsol est un nouveau produit qui, jusqu'ici, a été peu employé.

Ces fluides ont un faible indice d'inflammabilité, une faible densité et une grande viscosité. Des charges d'additifs améliorent la stabilité à l'oxydation des mélanges de fluides ainsi que les autres propriétés physiques et chimiques du fluide.

2.3.2 Considérations relatives au fonctionnement. Les hydrocarbures aliphatiques sont de dix à vingt fois plus visqueux que les ascarels ou les huiles types pour transformateur. Certains fabricants soutiennent qu'il s'agit là d'un avantage car, dans le cas d'un *transformateur bien conçu*, en conditions de surcharge (température élevée), la viscosité des hydrocarbures aliphatiques peut toujours diminuer à mesure que monte la température dans une plage où la dissipation de la chaleur est très critique. On affirme que lorsque la viscosité est inférieure à 5×10^{-6} m^2/s, une diminution plus poussée de la viscosité améliore peu la capacité de dissipation de la chaleur. Dans le cas des ascarels, cela se produit à 50 °C; en général, les RTEmp n'atteignent cette viscosité qu'à une température supérieure à 150 °C.

La rigidité diélectrique et le coefficient de dilatation thermique sont comparables à ceux des ascarels. Aux températures inférieures à 0 °C, ces fluides ont l'avantage de ne pas souffrir d'une perte de rigidité diélectrique qu'on a associée à des ratés de démarrage à froid.

Vu leur température d'écoulement inférieure à celle des ascarels, les poly-α-oléfines offrent une plus grande diversification d'emploi aux basses températures. Bien que le RTEmp se trouble sur un large intervalle de température, à partir de -10 °C, il n'est pas affecté de la discontinuité diélectrique souvent associée à ce phénomène. Pendant la formation d'un arc électrique, il y a production de petites quantités de carbone et d'acétylène, mais on ne considère pas qu'il s'agisse là d'un problème grave. Si les poly-α-oléfines viennent à se décomposer, il peut y avoir libération d'hydrogène, de méthane et de monoxyde de carbone.

Les hydrocarbures aliphatiques peuvent servir au remplissage des transformateurs. Ces liquides sont miscibles avec les ascarels ou les autres fluides utilisés dans les transformateurs, et ils sont compatibles avec la plupart des joints d'étanchéité et des matériaux servant à la construction d'équipements électriques. Dans les transformateurs isolés à l'ascarel, jusqu'à 40 p. 100 du volume du fluide d'appoint peut être du RTEmp. On

a fixé cette limite de 40 p. 100 pour éviter le point où la courbe de densité en fonction de la température du mélange croise la courbe correspondante pour l'eau (glace).

2.3.3 Considérations relatives à l'environnement et aux cas d'incendie. Les hydrocarbures aliphatiques sont conformes aux exigences de la Factory Mutual, et on les considère comme des fluides peu inflammables. En cas d'incendie, il peut y avoir formation de fragments aliphatiques, de dioxyde de carbone et de monoxyde de carbone.

En milieu de travail, il faut prendre les mêmes précautions lors de l'entretien et de la manutention qu'avec les transformateurs classiques isolés à l'huile afin de limiter l'exposition aux hydrocarbures aliphatiques. Ces liquides peuvent causer une légère irritation de l'oeil, de la peau et des muqueuses. Sur les lieux de travail, on a recommandé comme teneur maximale d'exposition une TLV• pour les brouillards d'huile de 5 mg/m^3.

Il faut contenir le déversement accidentel de ces liquides, absorber ces derniers avec de l'argile, de la sciure de bois ou d'autres sorbants industriels qu'on verse ensuite dans des fûts en acier munis de couvercles, en attendant leur récupération ou leur élimination. On peut se débarrasser des hydrocarbures aliphatiques usés par incinération dans des conditions déterminées.

2.4 Tétrachloro-éthylène

2.4.1 Information générale. Le tétrachloro-éthylène, C_2Cl_4, est un composé chimique produit en grande quantité par l'industrie et très utilisé pour le nettoyage à sec. On a songé à l'utiliser pour remplacer les ascarels, car on le considère ininflammable, et parce qu'il a l'avantage d'avoir une faible viscosité. Deux compagnies proposent le tétrachloro-éthylène comme fluide isolant pour transformateur:

- WECOSOL™
  Westinghouse Electric Corporation
  Small Power Transformer Division
  South Boston, Virginia
  USA 24592

- Perclene TG•
  Diamond Shamrock Corporation, 1981
  Electro Chemicals Division
  351 Phelps Court
  Irving, Texas
  USA 75061

Ces produits sont vendus sous forme de liquides très purifiés ayant les propriétés chimiques du tétrachloro-éthylène. Le fluide vendu par la Westinghouse, le WECOSOL™, a une faible teneur en additif et contient un colorant irridescent aidant à déceler les fuites.

2.4.2 Considérations relatives au fonctionnement. La viscosité du tétrachloro-éthylène est inférieure d'un ordre de grandeur à celle des huiles types pour transformateur. Il s'ensuit une amélioration de la capacité de dissipation de la chaleur. La grande densité du fluide lui confère aussi des avantages thermiques, bien que sa chaleur spécifique soit inférieure à celle des ascarels et de la plupart des autres fluides.

Sa rigidité diélectrique est comparable à celle des ascarels. Lorsqu'il y a formation d'un arc électrique, il n'y a production d'aucun gaz explosif, bien qu'on ait normalement décelé de petites quantités de Cl_2 et de HCl en plus du CO_2 et du CO.

Comme le tétrachloro-éthylène est une petite molécule, il n'y a aucun problème de formation de boues.

La plupart des fabricants signalent la possibilité de problèmes de compatibilité. On ne recommande pas de remplir les transformateurs avec du tétrachloro-éthylène à cause de son incompatibilité avec les joints d'étanchéité. Étant donné que le tétrachloro-éthylène est non miscible avec les ascarels, les silicones et les autres fluides, on peut supposer qu'il ne faut pas l'utiliser avec ces matériaux.

2.4.3 Considérations relatives à l'environnement et aux cas d'incendie. Les Underwriter's Laboratories et la Factory Mutual n'approuvent pas son utilisation dans les transformateurs. Dans le cas d'un incendie généralisé où il y a du tétrachloro-éthylène, on peut s'attendre à ce qu'il se forme du chlorure d'hydrogène et du phosgène (gaz toxique).

Le tétrachloro-éthylène apparaît dans la Liste des produits chimiques d'intérêt prioritaire de la *Loi sur les contaminants de l'environnement* de 1982. En milieu de travail, on doit faire attention à limiter l'exposition. Le tétrachloro-éthylène irrite les muqueuses, et il est anesthésique. En milieu de travail, on a recommandé comme teneur maximale d'exposition une TLV® de 100 ppm et une STEL de 150 ppm. La conception et l'opération des transformateurs doivent se faire en ayant soin de minimiser la quantité de gaz libéré, vu surtout que le point d'ébullition du tétrachloro-éthylène est inférieur à 150 °C, température cible de fonctionnement des transformateurs.

Le tétrachloro-éthylène libéré dans l'environnement s'évapore rapidement de l'eau ou du sol. La dégradation, par oxydation dans la basse atmosphère, est assez rapide,

de sorte que seulement 2 p. 100 à 3 p. 100 du produit atteignent la stratosphère, dont la destruction de l'ozone pourrait poser un problème. La façon la plus sûre de minimiser les répercussions délétères sur l'environnement est de se débarrasser du tétrachloro-éthylène usé par incinération ou par un mode équivalent de dégradation des hydrocarbures chlorés à faible masse moléculaire en chlorure inorganique. On recommande de nettoyer les déversements avec des absorbants industriels ordinaires. On devrait laisser l'absorbant usé "s'assécher", c'est-à-dire le laisser libérer le tétrachloro-éthylène dans l'atmosphère plutôt que de s'en débarrasser dans une décharge contrôlée. L'incinération ou un mode équivalent d'élimination pourraient également convenir.

2.5 Mélanges de chlorobenzènes

2.5.1 Information générale. Les mélanges de chlorobenzènes contiennent des isomères de trichlorobenzène et de tétrachlorobenzène souvent ajoutés aux PCB dans les transformateurs. On les ajoute pour régler la viscosité et la température d'écoulement. On s'en est servi pour rétablir le niveau de fluide dans les transformateurs aux ascarels, vu la similitude de leurs propriétés et leur compatibilité avec les ascarels. Deux compagnies proposent des mélanges de chlorobenzènes utilisables comme fluides pour transformateur:

- Mélange de trichlorobenzène et de tétrachlorobenzène
  May and Baker Canada Inc.
  Chemicals Department
  6557 Mississauga Road
  L5N 1A6

- Dielectrol I•
  General Electric Company
  One River Road
  Schenectady (New York)
  USA 12345

2.5.2 Considérations relatives au fonctionnement. La viscosité des trichlorobenzène et tétrachlorobenzène est inférieure d'un ordre de grandeur à celle des huiles types pour transformateur. Il s'ensuit une amélioration des propriétés de dissipation de la chaleur. La haute densité du fluide lui confère aussi des avantages thermiques.

La rigidité diélectrique est comparable à celle des ascarels. Les résultats des essais à l'arc électrique n'ont montré aucune formation de gaz explosif, bien qu'on ait décelé du Cl_2 et du HCl. On s'en est servi comme diluants des ascarels dans les transformateurs, à cause de leur miscibilité et de la similitude de leurs propriétés. Les chlorobenzènes sont des solvants puissants qui, souvent, ne sont pas compatibles avec bien des matériaux pour joints d'étanchéité utilisés normalement dans l'équipement électrique.

2.5.3 Considérations relatives à l'environnement et aux cas d'incendie. Bien que l'on considère les chlorobenzènes comme ininflammables, leur combustion à des températures élevées produit, entre autres, du chlorure d'hydrogène.

En milieu de travail, on doit faire modérément attention à en limiter l'exposition. Le Dielectrol I, qui contient du trichlorobenzène et tétrachlorobenzène, est un irritant moyen pour les yeux, la peau et les muqueuses. La teneur maximale d'exposition sur les lieux de travail recommandée est de 300 mg/m^3 (TLV•).

Les chlorobenzènes apparaissent dans la liste des produits chimiques d'intérêt prioritaire d'Environnement Canada en attendant une évaluation et des études plus poussées pouvant amener une réglementation restrictive. Bien que des essais de toxicité aiguë n'aient montré que des effets modérés, ils persistent longtemps dans l'environnement, et leur facteur de bio-accumulation de 1000 fait craindre qu'ils ne s'accumulent dans la chaîne alimentaire. Avant de considérer que les mélanges de chlorobenzènes sont acceptables comme substituts des PCB dans les transformateurs, on aura besoin de renseignements plus détaillés sur leurs répercussions environnementales et toxicologiques.

On recommande de nettoyer les déversements avec des absorbants industriels ordinaires. On peut ensuite récupérer l'absorbant usé ou s'en débarrasser. Il est aussi possible d'absorber le liquide sur de l'argile ou de la sciure de bois qu'on recueille ensuite dans des fûts en acier munis de couvercles.

On ne recommande pas leur incinération, à moins que ce ne soit dans des installations où la température est très élevée et où se fait l'absorption des effluents gazeux.

2.6 Mélanges d'esters de penta-érythritol

2.6.1 Information générale. On a proposé des mélanges d'esters de penta-érythritol d'acides gras pour remplacer les ascarels à cause de leur faible inflammabilité et leur rendement élevé. Les compagnies suivantes proposent d'utiliser le Midel 7131, un mélange d'esters de penta-érythritol, comme fluide pour transformateur:

- Micanite & Insulators Co. Limited (R.-U.)
  Westinghouse Road
  Trafford Park, Manchester
  England, M17 1PR

- The D & D Group
  P.O. Box 372
  Smithville (Ontario)
  L0R 2A0

2.6.2 Considérations relatives au fonctionnement. La viscosité du Midel 7131 est quatre fois supérieure à celle des huiles types pour transformateur. Le point d'écoulement de l'ester est inférieur à celui des ascarels, ce qui le rend mieux adapté au fonctionnement des transformateurs aux basses températures.

La rigidité diélectrique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation sont comparables à ceux des huiles types pour transformateur. En présence d'un arc électrique, il n'y a eu aucune production de gaz ou de substances toxiques. L'ester est compatible avec la vaste gamme de matériaux utilisés dans les transformateurs. Vu sa compatibilité, le Midel peut être utilisé comme fluide d'appoint sans poser de problème.

2.6.3 Considérations relatives à l'environnement et aux cas d'incendie. L'indice d'inflammabilité de ce fluide est suffisamment bas pour satisfaire aux normes régissant son utilisation comme fluide de remplacement dans les transformateurs. On recommande de prendre les mêmes précautions pour la manutention du Midel que pour les fluides à base de pétrole.

3 RÉPERCUSSIONS DES RÈGLEMENTS SUR L'UTILISATION DES POLYCHLOROBIPHÉNYLES

3.1 Transformateurs existants

À compter du 1er juillet 1981, moment où l'amendement au Règlement nº 1 sur les chlorobiphényles entrait en vigueur, l'utilisation de PCB comme constituants de transformateurs fabriqués ou importés au Canada a été interdite. L'utilisation de transformateurs isolés à l'ascarel, fabriqués ou importés avant le 1er juillet 1980, est toujours permise; aucun des autres règlements sur les chlorobiphényles présentement en cours d'élaboration n'interdira de continuer d'utiliser ces transformateurs.

Il est permis de manipuler les PCB pendant la réparation et(ou) l'entretien régulier des transformateurs à l'ascarel, mais il est interdit d'y ajouter de nouveaux liquides contenant des PCB. Les fluides d'appoint servant à compenser les pertes des transformateurs doivent donc être des fluides exempts de PCB, qui sont compatibles avec les ascarels.

Les fluides d'appoint dont le choix est le plus évident sont les trichlorobenzène et tétrachlorobenzène qui existent déjà dans tous les transformateurs aux ascarels. Leur taux dans les diverses marques d'ascarels varie, mais, il ne dépasse pas en général 40 p. 100.

Comme la température d'écoulement des chlorobenzènes purs est beaucoup plus élevée que celle de la plupart des ascarels, on s'est inquiété de la possibilité que la dilution des ascarels avec ces substances soit dangereuse à basse température pour les transformateurs à faible charge ou hors tension.

Des essais effectués par la M.M. Dillon Ltée en mars 1979 ont démontré qu'il est sécuritaire d'ajouter un tiers de chlorobenzènes purs aux ascarels dans les transformateurs dont la composition initiale renferme jusqu'à 40 p. 100 de ces produits.

Les renseignements obtenus auprès de trois compagnies importantes fabriquant des transformateurs sont confirmés par un grand nombre d'usagers, indiquant que les besoins de fluide d'appoint dans le transformateur sont bien en-deçà des limites sécuritaires recommandées pour les trichlorobenzène et tétrachlorobenzène. D'après nos rencontres avec de nombreux fabricants et usagers de transformateurs, nous sommes d'avis que l'interdiction des PCB dans les fluides d'appoint pour transformateurs ne suscitera pas de problème.

Bien que les fluides d'appoint les plus utilisés soient des chlorobenzènes, d'autres fluides, par exemple le RTEmp ou le Midel 7131, semblent convenir à ces fins. On s'est déjà servi, avec de bons résultats de ces deux liquides comme liquide d'appoint des transformateurs à l'ascarel.

3.2 Installation de nouveaux transformateurs

L'interdiction d'utiliser de nouveaux transformateurs à l'ascarel a posé le problème de trouver un substitut acceptable dans le cas des nouveaux transformateurs qui doivent être ininflammables.

3.2.1 Transformateurs secs. Dans certains cas, la solution la plus pertinente est l'utilisation de transformateurs secs refroidis à l'air au lieu de transformateurs isolés à l'ascarel. On peut classer les transformateurs secs en trois grandes catégories d'après leur construction:

a) ceux à refroidissement naturel,

b) ceux encapsulés à l'époxy,

c) et ceux à enroulement dans un moule.

Les applications des transformateurs secs sont limités du point de vue voltage et capacité.

Dans des endroits propres et secs, lorsque le primaire et la charge ne dépassent pas respectivement 15 kV et 600 kVA, les transformateurs les plus économiques à utiliser sont ceux à ventilation naturelle.

Ils ont tendance à être bruyants, n'ont qu'une faible capacité de surcharge et possèdent une médiocre tension de tenue aux chocs. De plus, ils sont plus gros qu'un transformateur à fluide équivalent.

Les transformateurs encapsulés à l'époxy et ceux à enroulement dans un moule ne sont pas aussi bruyants que les transformateurs à ventilation naturelle, et ils ne sont pas soumis aux mêmes restrictions au sujet des conditions ambiantes. Toutefois, ils coûtent en général davantage qu'un transformateur équivalent à fluide. La comparaison des coûts varie en fonction de la tension nominale et de la capacité nominale (kVA) ainsi que du type de liquide utilisé.

Comme les transformateurs secs sont plus gros que les transformateurs à fluides de même capacité et de tension comparable, il est plus difficile ou, à certains endroits, même impossible de remplacer un transformateur à l'ascarel par un appareil de type sec à cause du manque d'espace.

3.2.2 Transformateurs à isolant liquide. Les critères de sélection des transformateurs à isolant liquide peuvent être classés en quatre catégories:

a) CRITÈRES DE SÉCURITÉ

Faible risque d'incendie et d'explosion.

b) CRITÈRES DE RENDEMENT

Rendement satisfaisant dans toutes les conditions prévisibles de fonctionnement, comme les fluctuations de charge, les coups de foudre et les surtensions de commutation.

c) CRITÈRES DE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Les fluides pour transformateurs doivent être non toxiques, non mutagènes et biodégradables ou non nocifs en cas de fuite dans l'environnement. On doit aussi pouvoir les jeter sans craindre de nuire à l'environnement dans le présent ou dans le futur.

d) CRITÈRES ÉCONOMIQUES

Coût de fabrication raisonnable et faibles coûts de fonctionnement (c.-à-d. rendement élevé à pleine charge, faibles pertes à vide et entretien facile).

Les transformateurs à l'ascarel sont conformes à tous les critères de sécurité, de rendement et de coûts, mais ils ne satisfont pas aux critères environnementaux.

Les transformateurs à huile minérale sont conformes à tous les critères de rendement, de protection de l'environnement et d'économie, mais ils ne satisfont pas aux critères de sécurité.

Il existe donc un besoin d'un fluide pour transformateur, qui soit sûr et fiable, et qui soit conforme aux quatre groupes de critères de sélection.

On présente au tableau 2 une comparaison des cinq types de fluides décrits au chapitre 2 du présent rapport:

- les silicones,
- les hydrocarbures aliphatiques,
- le tétrachloro-éthylène,
- les mélanges de chlorobenzènes,
- les mélanges d'esters de penta-érythritol.

Ces cinq types de fluides ininflammables sont tous acceptables pour usage à l'intérieur. Les ascarels ne sont pas acceptables parce qu'ils sont nuisibles pour l'environnement, et l'huile minérale ne peut être employée dans les transformateurs placés à l'intérieur, à moins d'être dans des voûtes à l'épreuve du feu. Les transformateurs à l'huile minérale sont encore très satisfaisants et demeurent les plus économiques dans le cas d'installations à l'extérieur.

Le tétrachloro-éthylène et les mélanges de chlorobenzènes sont ininflammables et reçoivent donc la meilleure cote du point de vue sécurité.

D'après la recherche de la Factory Mutual, les silicones, les hydrocarbures aliphatiques et les mélanges d'esters de penta-érythritol sont sur la liste des *Less Flammable Transformer Fluids*. Les taux de dégagement de chaleur, par convection et par radiation, publiés par la Factory Mutual Research, sont passablement plus bas pour les silicones que pour les hydrocarbures aliphatiques et les mélanges d'esters de penta-érythritol. Dans le tableau 2, les silicones reçoivent la cote "satisfaisante" au point de vue sécurité, alors que les autres substituts à l'étude ne sont considérés "qu'acceptables". Le

TABLEAU 2 COMPARAISON DES FLUIDES POUR TRANSFORMATEURS

	Critères de sélection			
Fluide	Sécurité	Rendement	Environnement	Coûts
Silicones	3	4	4	2
Hydrocarbures aliphatiques	2	4	4	3
Tétrachloro-éthylène	4	4	3	3
Mélanges de chlorobenzènes	4	4	2	3
Mélanges d'esters de penta-érythritol	2	4	4	2
Ascarels	4	4	1	3*
Huile minérale	1**	4	4	4

Cotes (accordées d'après le jugement de l'entrepreneur)

4 - très satisfaisant; 3 - satisfaisant; 2 - acceptable; 1 - insatisfaisant.

* On ne peut plus se procurer d'ascarels.

** Si l'on s'en sert à l'intérieur, sans voûte à l'épreuve du feu.

taux de dégagement de chaleur du mélange d'esters de penta-érythritol est inférieur à celui des hydrocarbures aliphatiques, sans pour autant être aussi bas que celui des silicones.

Tous les fluides inscrits au tableau 2 ont un rendement très satisfaisant lorsqu'on s'en sert dans un nouveau transformateur conçu pour ce type de fluide.

Toutefois, les mélanges de chlorobenzènes et, à un moindre degré, le tétrachloro-éthylène pourraient peut-être nuire à l'environnement. Actuellement, leur utilisation à d'autres fins que l'isolation des transformateurs est approuvée. Il est nécessaire d'effectuer des études supplémentaires pour évaluer précisément leur nocivité.

Tous les fluides ininflammables pour transformateur coûtent plus cher que l'huile minérale.

4 REMPLISSAGE DES TRANSFORMATEURS

Aux États-Unis, depuis 1975 environ, soit quelques années après que la Monsanto ait interrompu la production d'ascarels, on a remplacé les ascarels des transformateurs par un autre fluide. On rapporte que, présentement, on remplace chaque année aux États-Unis le fluide de 600 à 800 appareils.

Les fluides de remplacement le plus souvent utilisés sont:

a) l'huile minérale (pour installation à l'extérieur ou dans une voûte à l'épreuve du feu),

b) les silicones,

c) le RTEmp,

d) le Midel 7131, récemment importé d'Angleterre.

Les appareils dont on a remplacé le fluide ont en général un rendement satisfaisant. Il n'y a eu aucun rapport à l'effet que le remplacement des ascarels par un autre fluide ait été directement la cause d'une panne. Dans certains cas, il a été nécessaire de diminuer la capacité nominale du transformateur de 10 p. 100 à 20 p. 100 à cause de la différence de viscosité et de chaleur spécifique entre les ascarels et le fluide de remplacement.

Malgré la réussite de l'opération, il y a eu aux États-Unis un ralentissement marqué des opérations de remplacement depuis 1979, année où on en a le plus effectuées. Voici certaines raisons de ce ralentissement:

a) la mauvaise publicité due à des déversements accidentels de PCB pendant les opérations de remplacement,

b) les restrictions imposées par la Factory Mutual Research sur l'emploi de transformateurs dont le fluide a été remplacé; on considère que certains des fluides de remplacement ne valent pas les ascarels du point de vue risque d'incendie.

Au Canada, ces opérations ne sont jamais devenues populaires. Pendant la période 1976-1981, on a remplacé les ascarels dans quelques transformateurs par des silicones et dans un ou deux autres, par de l'huile minérale. En avril 1982, pour fins de démonstration expérimentale, on a remplacé les ascarels d'un transformateur d'une usine municipale de distribution d'eau par du Midel 7131.

Dans bien des cas, il n'est ni pratique, ni souhaitable pour l'environnement de remplacer les ascarels des transformateurs si l'on n'a pas facilement accès à des installations permettant l'élimination des PCB. Il peut être plus dangereux pour l'environnement et la santé de stocker les ascarels et les fluides de vidange contenant des PCB provenant de l'opération de remplacement, que de continuer à se servir de transformateurs isolés à l'ascarel installés dans des endroits surveillés dont l'accès est limité au personnel autorisé.

À l'avenir, lorsqu'on disposera d'installations permettant l'élimination des PCB, on pourra envisager, dans des cas spécifiques, la possibilité de remplacer le fluide d'un transformateur plutôt que l'appareil lui-même par un autre ne contenant pas de PCB. Il serait par exemple particulièrement souhaitable de se débarrasser des ascarels dans les usines de préparation des aliments et près des pièces d'eau, endroits où l'on considère que même une faible probabilité de déversement de PCB constitue un risque inacceptable. À certains de ces endroits, il peut être beaucoup plus difficile et coûteux de remplacer les transformateurs aux ascarels par des appareils ne contenant pas de PCB plutôt que de remplacer uniquement le fluide isolant.

Si l'on envisage le remplacement du fluide, il faut tenir compte des facteurs suivants:

a) Le fluide de remplacement doit être compatible avec les matériaux de construction du transformateur.

b) Le coefficient de dilatation thermique du fluide de remplacement doit être assez voisin de celui des ascarels, afin d'empêcher l'exposition des enroulements à basse température et la présence d'un volume excessif de fluide aux températures élevées.

c) Il faut tenir compte de la capacité du fluide de remplacement comme caloporteur, savoir s'il y a diminution de la capacité nominale du transformateur et, le cas échéant, si elle est acceptable.

d) Il faut vérifier les répercussions qu'auraient les exigences des assureurs ainsi que les normes et règlements applicables des autorités locales chargées d'inspecter les installations électriques à l'égard du fluide de remplacement.

5 COMMENTAIRES ET RECOMMANDATIONS

5.1 Entretien des transformateurs à l'ascarel

L'interdiction d'employer des PCB comme fluide d'appoint pour les transformateurs isolés à l'ascarel ne semble pas avoir créé de problèmes. La quantité de fluide d'appoint nécessaire est habituellement minime. La plupart des transformateurs isolés à l'ascarel ne requièrent pas de fluide d'appoint avant plusieurs années de fonctionnement. Quand cela devient nécessaire, les trichlorobenzènes et les tétrachlorobenzènes semblent le mieux convenir comme fluide d'appoint. Étant un des composants de l'ascarel, iis sont tout-à-fait compatibles avec celui-ci. On a également employé avec succès comme fluide d'appoint dans les transformateurs à l'ascarel le Midel 7131 et le RTEmp.

5.2 Remplacement des transformateurs à l'ascarel

Il n'existe pas de solution "idéale" de remplacement des transformateurs à l'ascarel. Les transformateurs à l'huile minérale conviennent le mieux à l'extérieur ou dans des voûtes souterraines à l'épreuve du feu. À l'intérieur, la construction d'une voûte à l'épreuve du feu est, dans la plupart des cas, irréalisable ou d'un coût prohibitif. Les transformateurs à l'ascarel seraient donc en général remplacés par des appareils ne contenant pas d'huile minérale. En plus du prix, il y a bien des facteurs à considérer si l'on veut choisir le transformateur approprié à un endroit donné.

Si l'on songe à utiliser un transformateur sec, il faut tenir compte de facteurs comme le niveau de bruit, le besoin d'air pur, le degré d'humidité, les fluctuations de la charge, la protection contre la foudre et l'espace disponible.

Si l'on songe à un transformateur à isolant liquide à l'épreuve du feu, les facteurs les plus importants sont:

a) le taux de dégagement de chaleur (à la fois par convection et par radiation) du fluide;

b) les exigences des compagnies d'assurance relativement à la construction du plafond et des murs adjacents ainsi que des rebords destinés à retenir les fuites de fluide;

c) les conditions de fonctionnement et les besoins d'entretien.

5.3 Installation de nouveaux transformateurs

Il est beaucoup plus facile de choisir le transformateur approprié à une nouvelle installation plutôt que celui servant à en remplacer un autre. D'habitude, il y a moins de

contraintes et, par conséquent, plus d'une solution acceptable. La décision doit être fondée sur les critères de sélection dont on a traité au chapitre 3 du présent ouvrage.

Lorsque le critère le plus important est la sécurité contre les incendies et les explosions (par exemple, un poste situé dans une mine souterraine), le meilleur choix serait celui d'un transformateur à fluide ininflammable comme le tétrachloro-éthylène.

Dans d'autres cas, il peut être impératif, pour des considérations écologiques, de se servir de transformateurs dont l'isolant est un fluide classé par la Factory Mutual comme "fluide moins inflammable", par exemple des silicones ou des mélanges d'esters de penta-érythritol.

La recherche et la mise au point de fluides isolants pour transformateurs se poursuivent, et il se peut que le fluide "idéal" de remplacement des ascarels reste encore à trouver.

BIBLIOGRAPHIE

Silicones

Information About Silicone Transformer Liquids. Dow Corning Corporation, Midland, Michigan 48640. (1980).

"New Silicone Transformer Fluid, An Environmental Review", *Pollution Engineering*, vol. 9, nº 8, p. 41-43 (août 1977).

Polydimethylsiloxane Fluids, Environmental Impact Analysis. M.P. Scarbel, General Electric Company, Silicone Products Department, Waterford, New York (18 novembre 1976).

Replacement Dielectric Liquids for Askarels in Capacitors and Transformers. R. Strom, Ontario Hydro, pour la Canadian Electrical Association, Montréal, Québec, 062D117. (octobre 1981).

Silicone Dielectric Fluids for Liquid Filled Transformers. J.S. Hurley, jr, et Dr A. Jorkelson, General Electric Company, Waterford, New York 12188. Présenté à la Power Engineering Society, 1974 Winter Meeting, New York (New York), (27 janvier au 1er février 1974).

Silicone Liquid Filled Transformers. R.A. Nelson, General Electric Company, Medium Transformer Department, Rome (Georgia). Présenté à l'American Power Conference, Chicago (Illinois), (19 avril 1977).

Silicone Product Data Sheet, Silicone Dielectric Fluid SF 97 (50). General Electric Company, Silicone Products Department, Waterford (New York) 12188.

Silicone Technical Information Sheet, SF 97 (50) - A Dielectric Coolant for Liquid Filled Transformers. General Electric Company, Silicone Products Department, Waterford (New York) 12188.

Hydrocarbures aliphatiques

Comments and Recommendations on Make-up Fluid for Askarel Transformers (Technical Paper). John Olmsted, RTE Corporation, RTE Fluids Division, 1900 E. North Street, Waukesha (Wisconsin) 53186, (15 novembre 1977).

Comments and Recommendations on Retrofilling of Transformers. John Olmsted, RTE Corporation, 1900 E. North Street, Waukesha (Wisconsin) 53186, (31 octobre 1977).

Material Safety Data Sheet, Gulf FR Electrical Fluid, and Additional Information. Gulf Oil Chemicals Company, P.O. Box 3766, Houston (Texas) 77001, (octobre 1980).

Operation and Maintenance of RTEmp Fluid Filled Transformers, J.B. Caldwell, RTE Corporation, RTE Fluids Division, 1900 E. North Street, Waukesha (Wisconsin) 53186.

PCB Substitutes - New Developments in Materials and Applications. James Caldwell, RTE Corporation, RTE Fluids Division, 1900 E. North Street, Waukesha, (Wisconsin) 53186. Préparé pour la 49th Annual Engineering Conference of the Missouri Valley Electric Association (12 avril 1978).

Product Information Sheet, RTEmp Fluid. RTE Corporation, RTE Fluids Division, 1900 E. North Street, Waukesha (Wisconsin) 53186, (21 janvier 1980).

Replacement Dielectric Liquids for Askarels in Capacitors and Transformers. R. Strom, Ontario Hydro, pour la Canadian Electrical Association, Montréal (Québec), (octobre 1981).

Technical Information, Uniroyal PAO-13CE. Uniroyal Chemical Company, Division of Uniroyal, Inc., Spencer Street, Naugatuck (Connecticut) 06770.

Toxicity, Transport Mechanisms and Environmental Impact of Dielectric Fluids. Margaret Piotrowski, RTE Corporation, 1900 E. North Street, Waukesha (Wisconsin) 53186, (juin 1978).

Typical Mepsol Properties Sheet. McGraw-Edison Company, 11131 Adams Road, Franksville (Wisconsin) 53126, (1982).

Tétrachloro-éthylène

"Diamond Shamrock's PCB Substitute", *Chemical Week* (20 janvier 1982).

Nonflammable Small Power Transformers. K.R. Linsley, Westinghouse Electric Corporation, American Power Conference (29 avril 1981).

Questions and Answers Relating to Wecosol™ Transformer Fluid. Westinghouse Electric Corp., South Boston, Virginia, Circular SA 11040.

Technical Bulletin, Perclene TG™, Diamond Shamrock Corporation, P.O. Box 191, Plainsville, Ohio 44077.

Mélanges de chlorobenzènes

Environment Canada Infonotes CCB-IN-5-80. *Substances in the List of Priority Chemicals -1979: Chlorobenzenes.* (Également disponible en français.)

Material Safety Data Sheet for Iralec. General Electric Company, One River Road, Schenectady (New York) 12345 (mars 1982).

Product Information Sheet for Iralec. Prodelec, 21 rue Jean Garjon, Paris 75008.

Provisional Specifications for tri/tetrachlorobenzene blend. May and Baker Canada, Inc., Mississauga, Ontario L5N 1A6.

Replacement Dielectric Liquids for Askarels in Capacitors and Transformers. R. Strom, Ontario Hydro, pour la Canadian Electrical Association, Montréal, Québec, (octobre 1981).

Esters

Midel 7131. The Micanite & Insulators Co. Ltd., Westinghouse Road, Trafford Park, Manchester, M17 1PR, Angleterre (septembre 1980).

Typical Comparison Data, Midel 7131. The D & D Group, Special Projects Division, P.O. Box 372, Smithville (Ontario), L0R 2A0.

POOR

QUALITY

ORIGINAL